



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**VÝVOJ A APLIKACE VÝPOČTOVÉHO MODELU BALISTICKY
ODOLNÉHO VRSTVENÉHO LAMINÁTU**

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF COMPUTATIONAL MODEL OF BALLISTIC RESISTANT
COMPOSITE LAMINATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Urbášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Jan Urbášek
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vývoj a aplikace výpočtového modelu balisticky odolného vrstveného laminátu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je návrh výpočtového modelu laminátu na bázi polyamidových vláken, vhodného pro explicitní simulace rychlých dějů při analýze balistické odolnosti konstrukcí. Při návrhu efektivního popisu materiálu, okrajových a počátečních podmínek bude využito dostupných výsledků experimentů prováděných firmou SVS FEM s.r.o. a Vojenský výzkumný ústav a.s. Verifikovaný model bude následně využit pro komplexní numerické simulace odolnosti vozidel a osob v prostředí explicitního numerického kódu LS-DYNA. Téma bude zpracováno v úzké součinnosti s firmou SVS FEM s.r.o.

Cíle diplomové práce:

1. Vytvořte výpočtový model laminátu pro účely balistické ochrany osob a konstrukcí.
2. Proveďte jeho validaci srovnáním s dostupnými experimenty.
3. Aplikujte vytvořený model při simulaci balistické ochrany vhodně vybraných objektů.

Seznam doporučené literatury:

FLORES-JOHNSON, E. A., SALEH, M., EDWARDS, L.: Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile, International Journal of Impact Engineering 38, 2011, 1022-1032.

BORVIK, T., LANGSETH, M., HOPPERSTAD, O. S., MALO, K.A.: Ballistic penetration of steel plates, International Journal of Impact Engineering 22, 1999, 855-886.

JONAS, G. H., ZUKAS, J. A.: Mechanics of penetration: Analysis and experiment, International Journal of Engineering Science 16, 1978, 879-903.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá výpočtovým modelováním balistiky odolného laminátu na bázi polyamidových vláken. Úvodní pasáže práce jsou zaměřeny na porozumění jednotlivých problematik, které úzce souvisí s interakcí střely a terče, a výpočtovým modelováním tohoto děje. Hlavním cílem práce bylo vytvořit výpočtový model, který je schopen reflektovat chování aramidové tkaniny při interakci se střelou. Během vývoje výpočtového modelu bylo posouzeno více metod modelování a rovněž bylo využito více modelů materiálu. Pro účely vývoje výpočtového modelu bylo využito dostupných dat a experimentů firem SVS FEM s.r.o. a VVÚ s. p. Výsledkem diplomové práce je výpočtový model aramidové tkaniny, který je určen pro simulace balistické ochrany. Tento výpočtový model je validován na základě dostupných experimentů. Validovaný výpočtový model je poté využit pro simulaci balistické ochrany.

Klíčová slova

Aramid, aramidová vlákna, aramidová tkanina, Kevlar, Twaron, Terminální balistika, Výpočtové modelování, LS-DYNA

Abstract

This master thesis is aimed at computational modeling of ballistic resistant layered laminate. The introductory sections of the thesis are aimed at understanding the individual topics that are closely related to the interaction of the projectile and target and computational modeling of this process. The main goal of this thesis was to create a computational model that is able to reflect the behavior of aramid fabric during the interaction with the projectile. During the development of the computational model were used more methods of modeling and also more material models were used. For the purposes of the development of the computational model were used the available data of the companies SVS FEM s.r.o. and VVÚ s.p. The outcome of the diploma thesis is a computational model of aramid fabric which is designed for ballistic protection simulations. This model is validated on the basis of available experiments. The validated computational model is then applied to the simulation of ballistic protection.

Keywords

Aramid, aramid fibers, aramid fabric, Kevlar, Twaron, Terminal ballistics, Computational modelling, LS-DYNA

Bibliografická citace

URBÁŠEK, Jan. Vývoj a aplikace výpočtového modelu balisticky odolného vrstveného laminátu [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121749>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jindřich Petruška.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Vývoj a aplikace výpočtového modelu balisticky odolného vrstveného laminátu* vypracoval samostatně, pod vedením prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. a uvedl jsem v seznamu všechny literární zdroje.

V Brně, 26. června 2020

Bc. Jan Urbášek

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu práce prof. Ing. Jindřichu Petruškovi, CSc. za vedení práce a cenné rady. Dále děkuji firmě SVS FEM s.r.o. za poskytnutá data, podklady a vybavení které bylo nezbytné pro vypracování této práce. Speciálně děkuji Ing. Radku Řídkému za cenné rady v oblasti explicitních výpočtů.

Závěrem bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu během studia.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Problémové situace	12
2.1	Formulace problému	12
2.2	Cíle práce	12
3	System podstatných veličin a volba metody řešení problému.....	13
3.1	Volba metody řešení problému	14
4	Úvod do problematiky	15
4.1	Aramid a aramidová vlákna	15
4.2	Balistika a terminální balistika.....	20
4.3	Základní konstitutivní vztahy	27
4.4	Metoda konečných prvků.....	29
5	Současný stav poznání.....	33
5.1	Metody výpočtového modelování tkanin.....	33
5.2	Srovnání MESO-heterogenní a MACRO metody	36
6	Simulační prostředí LS-DYNA	40
6.1	Modely materiálu vhodné pro tkaniny v LS-DYNA.....	41
6.2	Podmínky porušení	44
6.3	Vybrané elementy v LS-DYNA	45
7	Materiál, materiálové zkoušky a experimenty.....	48
7.1	Tahová zkouška	48
7.2	Zkouška protlačení kulovým trnem	49
7.3	Střelecká zkouška do balistické plastelíny	50
8	Vývoj výpočtového model	52
8.1	MESO metoda	53
8.2	MACRO metoda - Simulace	58
8.3	MACRO metoda – výpočtové modely	63
8.4	Zhodnocení výpočtových modelů	91
9	Validace a aplikace výpočtového modelu	94
9.1	Simulace střelecké zkoušky do balistické plastelíny	94

9.2	Simulace interakce střepiny a tvrdé balistické ochrany	99
10	Závěr	104
11	Seznam použité literatury	106
12	Seznam obrázků	111
13	Seznam tabulek.....	114

1 Úvod

S technickým vývojem úzce souvisí vývoj balisticky odolných ochranných prvků. Tyto prvky se převážně využívají k zastavení střel nebo fragmentů. Pro ochranu osob a konstrukcí se využívají nejrůznější formy balistické ochrany, kde se využívá řada materiálů se specifickými vlastnostmi. V současnosti je kladen veliký důraz na snižování hmotnosti při zachování nebo i zvýšení balistické odolnosti ochranných prostředků. Toto je jeden z důvodů, proč se stále více využívají aramidová vlákna jako balistická ochrana. Aramidová vlákna mají řadu předností. Hlavní předností je vynikající poměr pevnosti ku hmotnosti, tedy měrná pevnost. Aramidová vlákna se využívají buďto samostatně nebo jako součást tvrdé balistické ochrany. Aramidová vlákna mohou být i součástí ochranných krytů v letectví, automobilovém průmyslu, či nejrůznějších bezpečnostních soustav.

Při vývoji balisticky ochranných prostředků je vždy nutné stanovit jejich balistickou odolnost. Stanovení balistické odolnosti se převážně provádí na základě experimentů, tedy střeleckých zkoušek. Nicméně tyto experimenty jsou velice finančně nákladné a navíc nám neumožňují nahlédnout dovnitř materiálu během penetračních procesů. Další možností, jak lze stanovit balistickou odolnost je s pomocí výpočtového modelu. Při této variantě odpadá nutnost provádět veliké množství experimentů. Dále nám tato varianta umožňuje nahlédnout dovnitř materiálu a sledovat penetrační procesy během interakce se střelou. Ve fázi vývoje balisticky odolných prostředků nám výpočtový model umožňuje provádět konstrukční změny a odhalit jejich nedostatky. Výpočtové modelování má řadu předností a v budoucnu lze očekávat větší využití pro stanovení balistické odolnosti a v průběhu návrhu balisticky odolných prostředků. Lze tedy konstatovat, že v průběhu návrhu a stanovování balistické odolnosti bezpečnostních prvků hraje výpočtové modelování zásadní a významnou roli.

2 Problémové situace

Jako balistická ochrana se často využívají lamináty na bázi polyamidových vláken. Stanovení balistické odolnosti těchto laminátů se provádí na základě série experimentů. Avšak tyto experimenty jsou velice nákladné, a navíc nám neumožňují sledovat procesy uvnitř laminátu během penetrace střelou. Jako progresivní metoda pro stanovení balistické odolnosti se jeví výpočtové modelování. Díky této metodě odpadá nutnost provádět veliké množství nákladných experimentů, a umožňuje nám sledovat penetrační procesy.

2.1 Formulace problému

Cílem práce je vytvořit výpočtový model laminátu na bázi polyamidových vláken, vhodného pro explicitní simulace rychlých dějů při analýze balistické odolnosti konstrukcí. Při návrhu efektivního popisu materiálu, okrajových a počátečních podmínek bude využito dostupných výsledků experimentů prováděných firmou SVS FEM s.r.o. Dále bude provedena validace srovnáním s dostupným experimentem. Poté bude výpočtový model aplikován pro posouzení balistické odolnosti vhodně vybraných objektů.

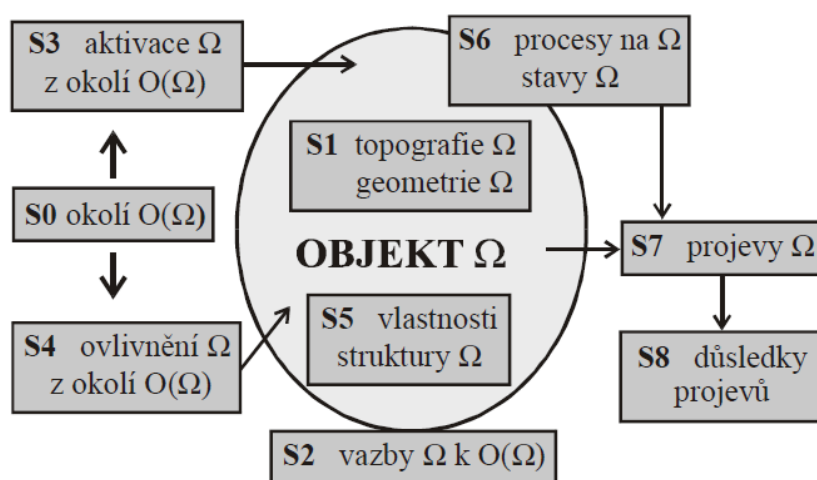
Jedná se o problém, neboť se vytváří nový model. Pro jeho vytvoření je třeba získat a aplikovat znalosti z více oborů.

2.2 Cíle práce

- Vytvořit výpočtový model laminátu pro účely balistické ochrany osob a konstrukcí.
- Provést validaci výpočtového modelu srovnáním s dostupnými experimenty.
- Aplikovat vytvořený výpočtový model při simulaci balistické ochrany vhodně vybraných objektů.

3 Systém podstatných veličin a volba metody řešení problému

Při řešení obecného problému by si řešitel měl nejprve stanovit a vytyčit všechny důležité veličiny, které jsou podstatné pro řešení daného problému na dané úrovni řešitelnosti. Řešitel tedy vytváří **systém podstatných veličin**. Systém podstatných veličin lze rozdělit na několik podmnožin S_i (Obr. 3.1). Při vyváření systému podstatných veličin řešitel přiděluje objektu, který je předmětem řešení problému, všechny podstatné veličiny. Tento postup zajišťuje to, že řešitel neopomene významné faktory související s řešením problému a bude moci správně vybrat metodu řešení problému [1].



Obr. 3.1 Podmnožiny systému podstatných veličin [1]

Problémem této práce je vytvoření výpočtového modelu balistiky odolného vrstveného laminátu na bázi polyamidových vláken. V rámci této práce je objektem vrstvený laminát na bázi polyamidových vláken. Systém podstatných veličin pro řešený problém je následující. (Všechny veličiny vystupující v této práci jsou uvažovány jako číselné a deterministické.)

Podmnožina S0: Okolí objektu

Okolím laminátu je střela. Podstatné jsou její rozměry, materiálové vlastnosti, rychlost.

Podmnožina S1: Topologie a geometrie

Rozměry laminátu, počet a orientace lamin.

Podmnožina S2: Vazby objektu s okolím

Uchycení laminátu.

Podmnožina S3: Aktivace objektu

Interakce laminátu se střelou.

Podmnožina S4: Působení okolí na objekt

Interakce střely s laminátem je především ovlivněna úhlem dopadu a rychlostí střely. Dále mechanické vlastnosti laminátu mohou být ovlivněny okolním prostředím (teplota, vlhkost, sluneční záření), nebo stárnutím materiálu.

Podmnožina S5: Oborové vlastnosti

Mechanické vlastnosti laminátu.

Podmnožina S6: Procesy a stavy objektu

Šíření napěťových vln v laminátu, penetrace laminátu střelou, tření mezi střelou a laminátem.

Podmnožina S7: Projevy objektu

Poškození a porušování jednotlivých vrstev, deformace a delaminace laminátu.

Podmnožina S8: Důsledky projevů objektu

Změna rychlosti střely (potažmo její zastavení), deformace střely, změna trajektorie střely (úhel odklonu).

3.1 Volba metody řešení problému

Jako metoda řešení problému je zvoleno výpočtové modelování, a to metoda konečných prvků. Problém bude řešen prostřednictvím řešiče LS-DYNA.

4 Úvod do problematiky

Při výpočtovém modelování balisticky odolného laminátu je třeba porozumět řadě problematik, které přímo nebo nepřímo souvisí s interakcí střely a terče. Z tohoto důvodu je uvedena rešeršní studie na jednotlivá témata, která jsou důležitá pro řešení samotného problému této diplomové práce.

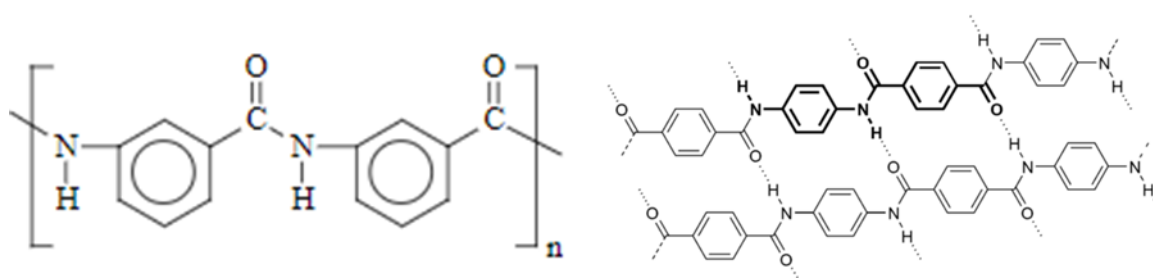
4.1 Aramid a aramidová vlákna

Aramid byl vyvinut Američankou Stephanie Kwolekovou v roce 1961. Samotný název aramid vznikl zkrácením názvu **aromatický polyamid**. Jedná se o velice pevný a žáruvzdorný materiál. K jeho nevýhodám patří nízká odolnost vůči ultrafialovému záření a obtížná barvitelnost. [2, 3]

Aramidová vlákna jsou častěji známa pod jejich obchodním názvem. Na světě převažují dvě společnosti, jež se zabývají výrobou, výzkumem a vývojem tohoto materiálu. První společnost se jmenuje DuPont a její produkt nese název Kevlar®. Tato společnost byla první, která začala hromadně vyrábět aramidová vlákna. Druhá společnost se jmenuje Teijin a její produkty jsou Twaron® a Technora®. [4]

Aramidová vlákna se dělí do dvou skupin: [3]

- **Meta-aramidy** – mají výbornou termickou odolnost a elektroizolační schopnosti (např. Nomex®)
- **Para-aramidy** – oproti meta-aramidům mají lepší mechanické vlastnosti (vyšší pevnost v tahu a Youngův modul pružnosti v tahu) (např. Kevlar®, Twaron®)



Obr. 4.1 Chemická struktura aramidu, meta-aramid, para-aramid [3]

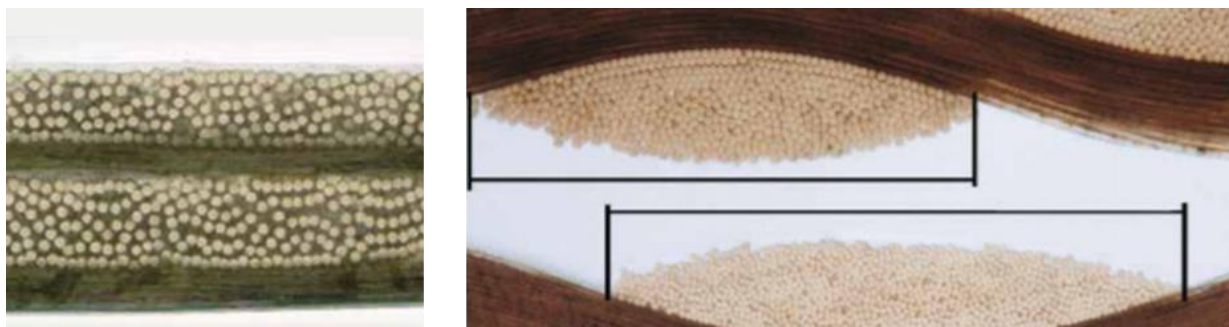
Jak již bylo výše uvedeno, aramidová vlákna vynikají především díky svým výborným mechanickým vlastnostem, a to především vysokou pevností v tahu a nízkou hustotou. Přehled srovnání mechanických vlastností vybraných materiálů je uveden v následující tabulce (Tabulka 4.4.1). [5, 38]

Tabulka 4.4.1 Srovnání mechanických vlastností vybraných materiálů [5]

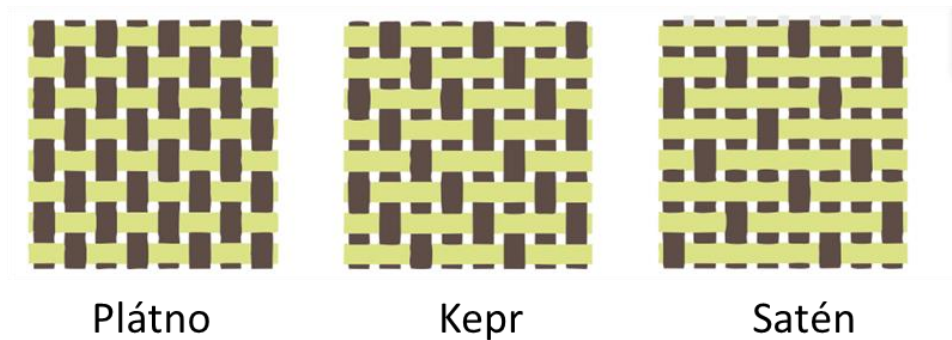
	Twaron®	Technora®	Kevlar® 49	Uhlíková vlákna	Skelná vlákna	Ocel
Hustota [<i>kg/m³</i>]	1440	1390	1440	1730 – 1910	2480 – 2620	7500 – 8000
Pevnost v tahu [<i>GPa</i>]	2,7-3,6	0,51 – 0,86	3,0	3,3 – 6	3 – 4,9	< 2,6
Modul pružnosti v tahu [<i>GPa</i>]	60 – 145	65 – 85	112,4	230 - 550	70 – 90	140 - 200
Tažnost [%]	2,3 – 4,2	3,9 – 4,5	2,4	0,7 - 2,1	2,5 – 3,5	< 15

4.1.1 Textilie a tkanina

Aramidová vlákna se v produktech vyskytují nejčastěji ve formě textilií. Základem textilie je vlákno. Z vláken je poté tvořena nit (příze). Spojením nití v jeden celek vzniká textilie. Nitě v textiliích mohou být uspořádány jednosměrně nebo jsou vzájemně provázány (Obr. 4.2). V takovém případě se textilie nazývá tkanina. Vzájemným provázáním nití vzniká vazba. Vazba tkaniny ovlivňuje její vzhled, pevnost, tuhost, tepelnou izolaci a jiné. V praxi jsou nejběžnější tyto typy vazeb: plátno, kepr, satén (Obr. 4.3). [6, 34]



Obr. 4.2 Řez strukturou textilií, jednosměrné uspořádání vláken, tkanina [6]



Obr. 4.3 Typy vazeb tkanin [8]

4.1.2 Využití aramidových vláken

Uspořádání aramidových vláken v produktech může mít řadu forem. Mohou být buďto součástí tkaných textilií (tkaniny), či jednosměrně orientovaných laminátů. Jednotlivé formy se od sebe liší v následujícím: [2, 3, 6]

- vazba tkaniny
- uspořádání nití v jednotlivých vrstvách
- jemnost nití
- použití kohezní složky (pryskyřice, epoxid, lepidlo)
- aplikaci povrchových vrstev

Pro názornost variability možných využití aramidových vláken jsou ukázány různé příklady produktů od společnosti Teijin.

Tkanina Twaron® Platin PT900

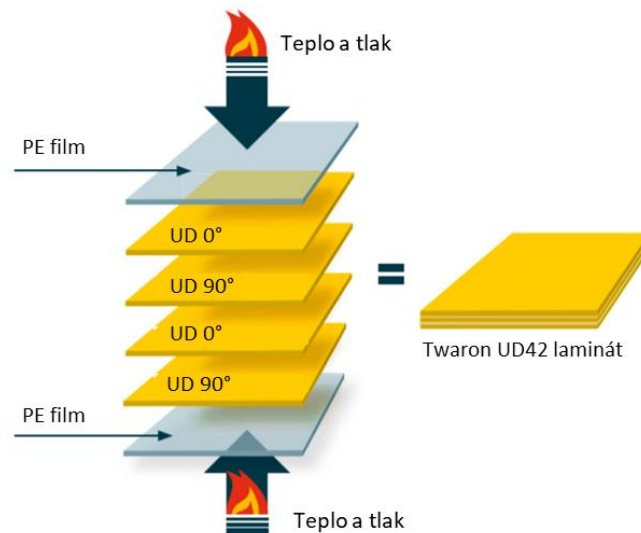
Jedná se o balisticky odolnou tkaninu. Tkanina je tvořena speciální vazbou, kdy je kombinovaná plátňová a saténová vazba. Díky této struktuře je tkanina extrémně odolná vůči balistickému impulzu. [6]



Obr. 4.4 Twaron Platin PT900 [6]

Twaron® UD42

Jedná se o jednosměrný vícevrstvý laminát. Laminát je tvořen ze 4 vrstev, kde v rámci jednotlivých vrstev jsou jednosměrně orientovaná aramidová vlákna (v konfiguraci 0°/90°/0°/90°). Horní a spodní vrstva jsou pokryty PE filmem, čímž je zajištěna větší abrazivní odolnost. [6]



Obr. 4.5 Twaron® UD42 [6]

Díky tomu, že aramidová vlákna mají nízkou hustotu a výborné mechanické vlastnosti mají široké uplatnění. Využívají se v následujících odvětvích: [6]

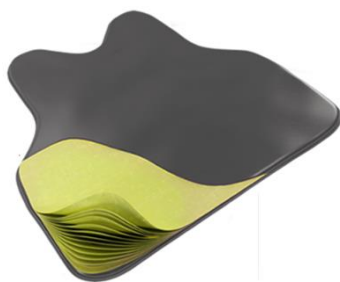
- Ochranné žáruvzdorné oděvy (hasiči)
- Sportovní potřeby – součást kompozitních materiálů (cyklistický rám, lyže,...)
- Pevná lana
- Výztuže pneumatik a jiných gumových výrobků
- Letecký průmysl
- Stavební průmysl

4.1.3 Aramidová vlákna jako balistická ochrana

Aramidová vlákna se také využívají jako balistická ochrana. Využívají se v následujících formách:

Měkká balistická ochrana

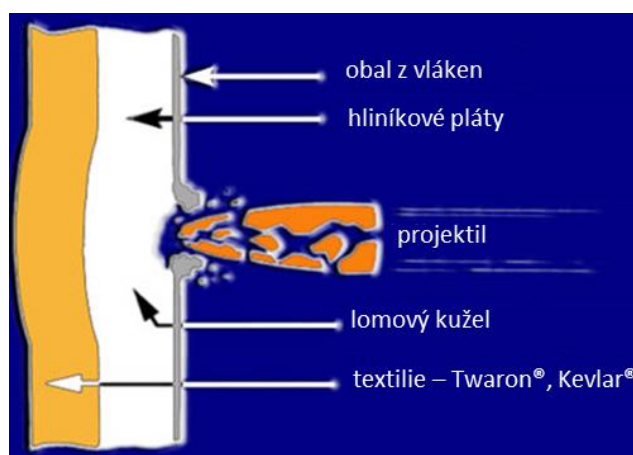
Funkcí měkké balistické ochrany je zastavení střel (střepin) a rozložení energie střely na větší plochu. Měkkou balistickou ochranou nejčastěji tvoří několik vrstev tkané textilie. Nejčastěji se využívá jako vložka do neprůstřelných vest. [6]



Obr. 4.6 Měkká balistická ochrana jako součást neprůstřelné vesty [6]

Tvrdá balistická ochrana

Tvrdou balistickou ochranou se rozumí použití tvrdých materiálů (kovy, keramika) k ochraně nejrůznějších objektů. Často se kombinuje více materiálů a využívá se i tkaných textilií. Tvrdá balistická ochrana součást pancířů vozidel, letadel, helikoptér, plavidel. [9]



Obr. 4.7 Příklad konstrukce pancíře [9]

Přilby

Balisticky odolné přilby se řadí do samostatné kategorie. Jejím cílem je chránit hlavu před střelami, střepinami, fragmenty, explozemi, avšak je třeba zachovat její lehkost a funkčnost. Přilby jsou často zhotoveny z několika vrstev aramidových textilií, které jsou vzájemně spojeny kohezní složkou (pryskyřice). [6]



Obr. 4.8 Neprůstřelná přilba [6]

4.2 Balistika a terminální balistika

4.2.1 Balistika

Balistika je věda, která se zabývá pohybem a účinkem střel. Popisuje chování střely uvnitř hlavně, během letu a efekt, jakým střela působí na cíl. [15, 16]

Balistika je rozdělena do následujících podoborů [16]:

- Vnitřní balistika – popisuje pohyb střely v hlavní zbraně
- Přejížděvací balistika – popisuje pohyb střely od opuštění hlavně do doby konce urychlování střely
- Vnější balistika – popisuje pohyb střely ve vnějším prostředí
- Terminální balistika – popisuje vliv střely a účinek střely na terč

4.2.2 Terminální balistika

Terminální balistika je obecný termín pro děje, které se uskutečňují během interakce střely a terče. Pod pojmem střela se v terminální balistice rozumí jakýkoliv projektil, střepina, fragment a jiné. Na základě kinetické energie se projektily dělí do 2 hlavních skupin. A to **malorážní projektily** (průměr je menší než 20 mm) a **velkorážní kalibry** (průměr je větší než 20 mm). [17]

Malorážních projektilů existuje celá řada. Nejčastěji se dělí podle jejich účelu [15]:

- Terčová střelba
- Maximální penetrace
- Maximální poškození



Obr. 4.9 Struktura 0.3" APM2 projektilu [17]

Příkladem **velkorážních projektilů** jsou průbojné podkaliberní střely. Ty jsou určeny pro ničení obrněných vozidel a další techniky. K proražení pancíře využívají vysoké kinetické energie jádra střely, která je z vysoce tvrdého kovu, nejčastěji wolfram [17].



Obr. 4.10 Dlouhá penetrační tyč [17]

Terče

Pod pojmem terč se v terminální balistice rozumí cíl, který zasáhne střela. Terče se z hlediska terminální balistiky klasifikují vzhledem k jejich tloušťce a poškození, které je důsledkem interakce střely a terče [17].

- **Polo-nekonečné terče** jsou dostatečně tlusté tak, aby boční a zadní povrchy nebyly ovlivněny penetračním procesem při interakci terče a střely. Předmětem vyhodnocení balistických testů je obvykle stanovení hloubky penetrace, objemu a tvaru výdutě. [17]
- **Přechodné terče** jsou dostatečně velké tak, aby zastavily střelu, avšak projevuje se u nich poškození či změna zadního povrchu. Během interakce střely a terče dochází k velmi komplikovanému penetračnímu procesu a může dojít k několika druhům poškození terče. [17]
- **Tenké terče** jsou projektilem plně perforovány a jejich význam pro terminální balistiku spočívá v tom, jaký mají vliv na projektil (poškození, zpomalení). [17]

Rázové zatěžování

Při interakci střely a terče dochází k tzv. rázovému zatížení. Při tomto zatížení dochází k náhlému uvolnění velkého množství energie. Rázové zatížení je typické svojí krátkou dobou trvání a vysokými rychlostmi deformace ve srovnání se statickým zatížením. Rozhodující charakteristikou při tomto zatížení je rychlost šíření vlny napětí. Vlna napětí se v tělese šíří rychlostí v závislosti na materiálových parametrech. Řada materiálů je rovněž citlivá na rychlost zatížení a může měnit své vlastnosti. [18]

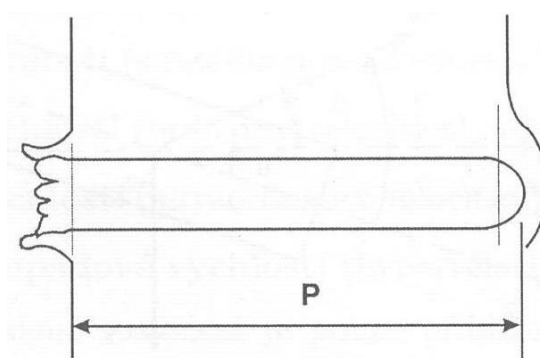
Stanovení balistické odolnosti terče

Stanovení balistické odolnosti terče se vždy vztahuje ke konkrétní dvojici střela-terč. Na základě balistické odolnosti lze jednotlivé terče klasifikovat do několika úrovní

ochrany. Podrobné stanovení jednotlivých úrovní je dáno příslušným standardem. [17, 18, 19]

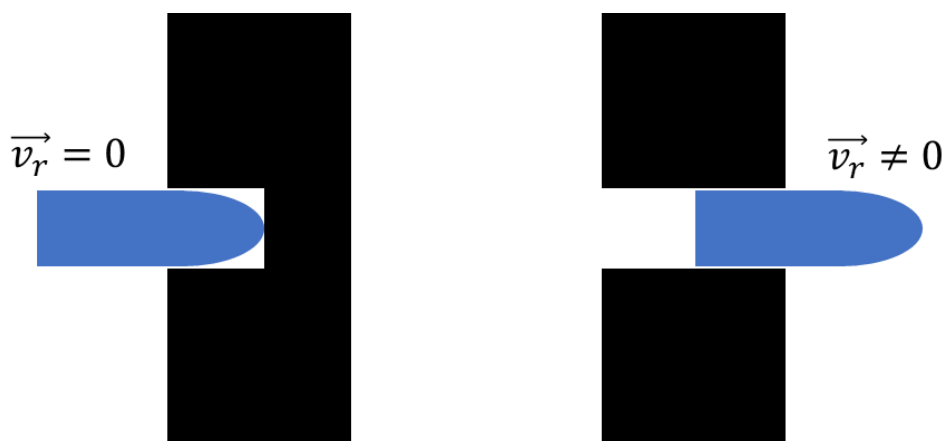
Při vyhodnocení balistické odolnosti se můžeme setkat s následujícími termíny:

- **Zbytková rychlost v_r** – Zbytková rychlost udává hodnoty rychlosti střely po interakci s terčem, v případě že dojde k průstřelu. [18]
- **Penetrace** – Penetrací se rozumí, kdy střela poškodí terč, avšak neprojde skrz celou tloušťku terče. Střela může zůstat nebo vypadnout z terče. Při stanovení balistické účinnosti terče se vyhodnocuje hloubka penetrace **P**. [18]



Obr. 4.11 penetrace, P – hloubka penetrace [18]

- **Perforace** – Perforací se rozumí, kdy střela projde skrz terč. Perforací se rovněž rozumí i případ, kdy střela sice neprojde skrz terč, avšak poškodí zadní plochu terče tak, že je možné vidět střelu, popřípadě po vytažení střely je viditelná dutina skrz celý terč. Avšak přesný význam termínu perforace je závislý na standardu, podle kterého je daný případ vyhodnocován. [17, 18, 19]



Obr. 4.12 Penetrace (vlevo), perforace (vpravo)

- **Limitní rychlost v_{bl}** – tato hodnota udává nejvyšší možnou rychlost střely, při které nedojde k perforaci terče. Tuto charakteristiku lze stanovit dvěma

experimenty při dvou velmi blízkých nárazových rychlostech. Při vyšší rychlosti musí střela perforovat terč, zatímco při nižší rychlosti nesmí dojít k perforaci. Avšak vzhledem k chybám, které se mohou stát během experimentu a rovněž k proměnným vlastnostem materiálu, je prakticky velmi komplikované stanovit v_{bl} . Z tohoto důvodu se zavádí kritická rychlost v_{50} . [17, 18]

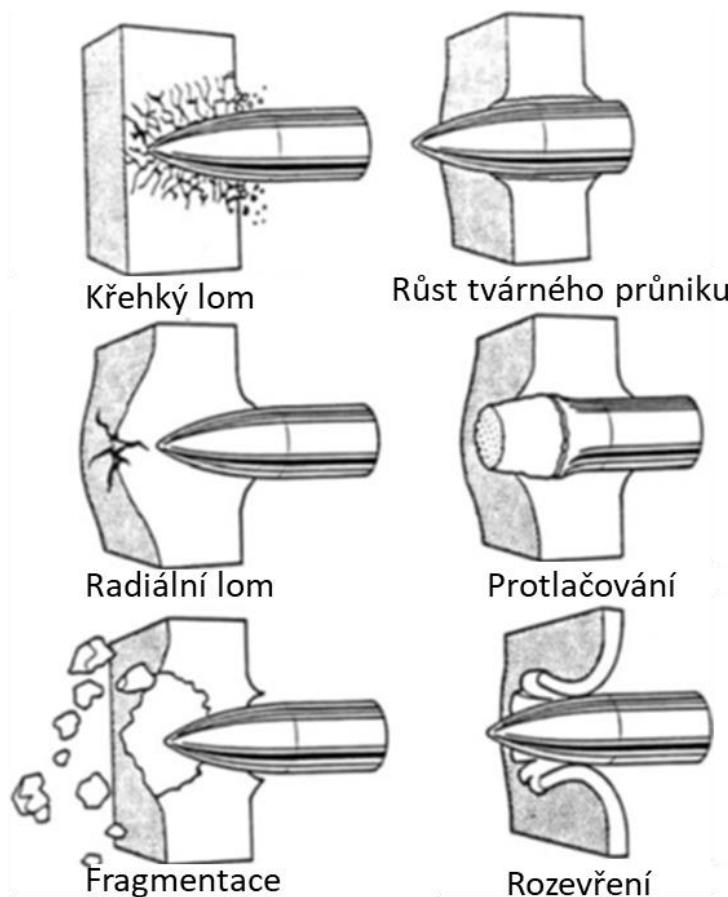
- **Kritická rychlost v_{50}** – kritická rychlost se stanovuje experimentálně ze statistického souboru. Mělo by být provedeno alespoň 6 experimentů blízkých v_{bl} . V polovině případů by mělo dojít k perforaci. v_{50} je tedy rychlost, při které dojde k perforaci s pravděpodobností 50 %. [17, 18]

Při interakci střely a terče dochází k deformaci terče a přenosu rázové vlny do zadní strany. Odtud se rázová vlna může dále šířit na objekt, který je za terčem. Rázová vlna se šíří, i v případě že nedojde k perforaci. Rázová vlna má negativní účinky na objekt, který je za terčem, v případě osoby existuje i riziko smrtelného zranění. Z tohoto důvodu je důležité rovněž vyhodnocovat velikost a hloubku deformované oblasti. [18]

Pozn: termíny *limitní rychlost v_{bl}* a *kritická rychlost v_{50}* je možné v literatuře dohledat pod různými názvy, avšak jejich význam je zachován.

Porušení terčů

V závislosti na dané dvojici střela-terč dochází u terčů k řadě druhů poškození. Charakter poškození je především závislý na materiálu terče a střely. Na následujícím obrázku (Obr. 4.13) jsou znázorněny některé charakteristické typy porušení [17, 18].

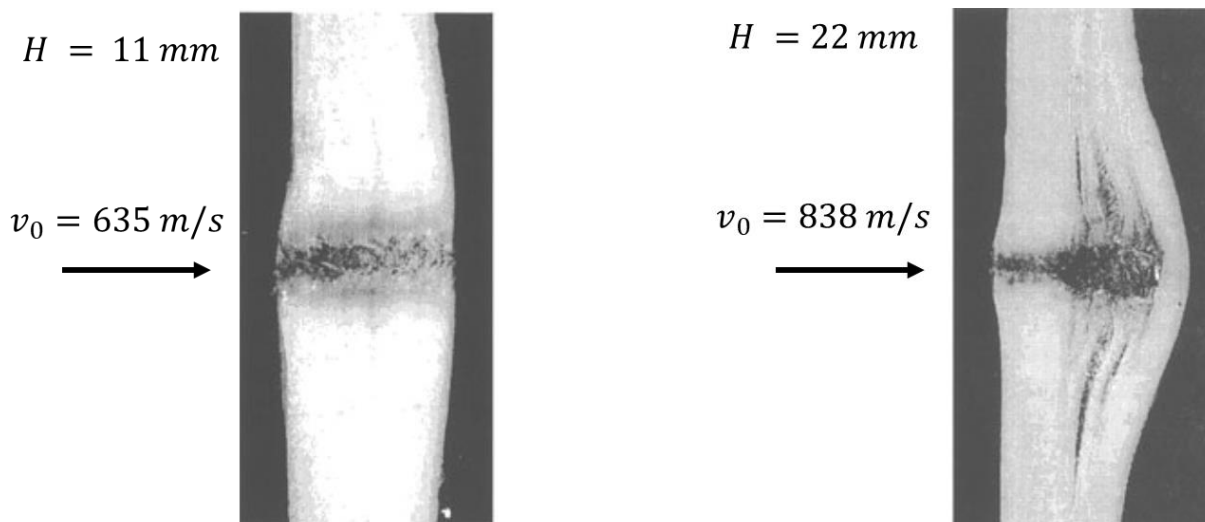


Obr. 4.13 Porušení [17,18]

Delaminace: delaminací se rozumí oddělování jednotlivých vrstev v laminátech. Jednotlivé vrstvy mohou být mezi sebou spojeny kohezní složkou [10].

Porušení tkaniny při balistickém impulzu

Interakce mezi střelou a tkaninou je znázorněna na následujícím obrázku (Obr. 4.14). Jedná se o průřez několika vrstev tkaniny o celkové tloušťce 11 mm a 22 mm. Do tkaniny byl vystřelen 5,56 mm projektil. Na levé straně je možné vidět tenký terč jež byl perforován. Výsledkem interakce je kráter, jehož průměr je blízký průměru projektilu. Toto je typické porušení relativně tenkých terčů, které jsou perforovány projektilem při vysokých rychlostech. Pravá strana obrázku ukazuje interakci střely a terče, jež byl dostatečně tlustý na to, aby zastavil střelu. Je možné pozorovat, že během první fáze docházelo ke střížným mechanismům během penetrace. V druhé fázi terč projevil svou vysokou pevnost v tahu, což je evidentní z rozsáhlého odklonu a delaminace zadních vrstev. S rostoucí hloubkou kráteru rovněž roste i jeho průměr, což je způsobeno postupnou deformací projektilu během procesu penetrace. [17]



Obr. 4.14 Řez laminátu na bázi tkaniny po balistickém impaktu [17]

Stanovení balistické odezvy na panel zhotovený z několika vrstev tkaných textilií lze rovněž stanovit na základě odezvy jedné nitě na balistický impuls. Extrapolace této odezvy na odezvu tkaniny je ovlivněna několika důležitými faktory. Těmito faktory jsou: struktura tkaniny, užití pryskyřice (kohezní složky), materiálové vlastnosti vláken, tvar a rychlost projektilu, interakce mezi vrstvami, okrajové podmínky (upevnění vláken), tření mezi vlákny a projektilem. Tato řada faktorů komplikuje analýzu penetrace a perforace, a závěry z dané sady experimentů nelze zobecnit pro jiné případy. [17]

Metody terminální balistiky pro stanovení balistické odolnosti terčů

V terminální balistice existuje několik inženýrských modelů, které jsou schopny stanovit balistickou odolnost terčů. Tyto modely mají řadu zásadních omezení. Největším omezením je, že jsou většinou určeny pro danou dvojici střela-terč. Navíc tyto modely jsou vytvořeny především pro kovové materiály. Dále tyto modely prakticky nelze použít pro pancíře, které kombinují několik materiálů. Z tohoto důvodu se v dnešní době stále více využívá výpočtové modelování. Navíc díky vývoji softwaru a hardwaru lze výpočtovým modelováním řešit více komplexní úlohy. [17, 18]

Konstrukce pancířů

Při navrhování konstrukce pancířů je třeba znát a porozumět jednotlivým mechanismům porušení. Optimální pancíř by měl být tvořen co nejjednodušší a nejlehčí možnou strukturou, která zabrání poškození chráněného objektu. V praxi se často využívají vrstvené lamináty, které jsou schopny kombinovat materiály s rozdílnými mechanickými vlastnostmi. Čelní část terče je při interakci se střelou namáhána tlakem, tudíž je zde kladen důraz na vysokou pevnost v tlaku. Tuto

vlastnost splňují například keramické materiály. Oproti tomu zadní vrstva terče je namáhána tahem, tudíž jsou zde použity materiály s vysokou pevností v tahu. Zadní vrstva by měla být rovněž schopna zachytit fragmenty od střely a pancíře. Z tohoto důvodu se do zadních částí pancířů často využívají tkané materiály s vysokou pevností a nízkou hmotností. [17, 18, 19]

4.3 Základní konstitutivní vztahy

Modely materiálu, které reflektují směrovou sktrukturu materiálu lze rozdělit do tří základních skupin [10]:

- izotropní
- ortotropní
- anizotropní

Při uvažování lineárně elastického materiálu lze popsat konstitutivní vztahy pomocí Hookova zákona. Obecný Hookův zákon v maticovém zápisu lze zapsat takto:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon$$

Kde: σ sloupcová matice složek napětí
 C matice materiálových parametrů
 ε sloupcová matice složek přetvoření

4.3.1 Izotropní materiál

Většinu materiálů jako ocel, polymery lze považovat za izotropní materiály. Tyto materiály jsou nezávislé na směru zatížení. Pro popis jejich chování je potřeba znát dvě ze čtyř uvedených elastických konstant. [11]

E [MPa] Youngův modul pružnosti

μ [-] poissonova konstanta

K [MPa] objemový modul

G [MPa] modul ve smyku

Hookův zákon pro izotropní materiál v tuhostní formě je dán následujícím vztahem:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)} \begin{pmatrix} 1 - \mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1 - \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1 - \mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - 2\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

4.3.2 Ortotropní materiál

Řada materiálů, jakožto kompozity, či tkané textilie lze považovat jako ortotropní materiály. Ortotropní materiál má tři hlavní ortotropní osy (x, y, z), které jsou vzájemně

ortogonální. Tento materiál má 9 nezávislých elastických konstant (s uvážením symetrie matice tuhosti). [10, 11]

E_x, E_y, E_z [MPa] Youngův modul

$\mu_{xy}, \mu_{yz}, \mu_{xz}$ [MPa] poissonův poměr

G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} [MPa] smykový modul

Hookův zákon v tuhostní formě pro ortotropní materiál je dán následujícím vztahem:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1 - \mu_{yz}\mu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\mu_{yx} + \mu_{zx}\mu_{yz}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\mu_{zx} + \mu_{yx}\mu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu_{xy} + \mu_{xz}\mu_{zy}}{E_z E_x \Delta} & \frac{1 - \mu_{zx}\mu_{xz}}{E_z E_x \Delta} & \frac{\mu_{zy} + \mu_{zx}\mu_{xy}}{E_z E_x \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu_{xz} + \mu_{xy}\mu_{yz}}{E_x E_y \Delta} & \frac{\mu_{yz} + \mu_{xz}\mu_{yx}}{E_x E_y \Delta} & \frac{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}}{E_x E_y \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{xy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

Kde:

$$\Delta = \frac{1 - \mu_{xy}\mu_{yx} - \mu_{yz}\mu_{zy} - 2\mu_{xy}\mu_{yz}\mu_{zx}}{E_x E_y E_z}$$

4.3.3 Anizotropní materiál

Nejobecnějším možným materiálem je anizotropní materiál. Tento materiál má 21 nezávislých elastických konstant (při uvážení symetrie matice tuhosti). Hookův zákon v tuhostní formě pro anizotropní materiál je dan následujícím vztahem. [10, 11]

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

4.4 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (dále jen MKP) je numerická metoda založená na diskretizaci tělesa nebo soustavy těles na malé podoblasti, tzv. prvky. Každý prvek je definován pomocí uzlů. Při řešení strukturálních úloh metodou konečných prvků zcela jednoznačně převládá variační formulace a deformační přístup, jedná se tedy o deformační variantu MKP. V této metodě jsou primární neznámé funkce uzlových posuvů. Je zde využito Lagrangeova variačního principu, který říká, že těleso je v rovnováze, jestliže jeho celková potenciální energie je minimální [13].

4.4.1 MKP v dynamice těles

Základní pohybová rovnice pro dynamickou úlohu v MKP je následujícího tvaru:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}(t)$$

Kde \mathbf{M} – matice hmotnosti

\mathbf{C} – matice tlumení

\mathbf{K} – matice tuhosti

\mathbf{F} – vektor zatížení

\mathbf{U} – vektor posuvů

$\dot{\mathbf{U}}$ – vektor rychlostí

$\ddot{\mathbf{U}}$ – vektor zrychlení

Stanovení matice tlumení \mathbf{C} je velice problematické. Na celkovém efektu tlumení se podílí následující vlivy:

- Materiálové tlumení
- Konstrukční tlumení
- Tlumící vliv prostředí

Vyjádřit matici tlumení, na základě výše uvedených vlivů je téměř nemožné. Z tohoto důvodu se zavádí tzv. **proporcionální tlumení**, kde matice tlumení \mathbf{C} je proporcionálně úměrné maticím hmotnosti a tuhosti.

$$\mathbf{C} = \alpha \cdot \mathbf{M} + \beta \cdot \mathbf{K}$$

Konstanty α a β je třeba stanovit experimentálně. [12]

4.4.2 Implicitní a explicitní algoritmus MKP

Výraz implicitní a explicitní algoritmus souvisí s časovou integrací pohybové rovnice. V následujících odstavcích jsou popsány principy jednotlivých algoritmů, jejich výhody a nevýhody.

Implicitní algoritmus

Principem implicitního algoritmu je řešení pohybové rovnice s využitím metody dopředných diferencí. Uvažujme řešení pohybové rovnice (bez tlumení) pro nestacionární dynamický problém. Předpokládejme, že známe řešení v časovém okamžiku $t_n(t_{n-1}, \dots)$, a naším cílem řešení rovnice v čase t_{n+1} , kde časový krok je $\Delta t = t_{n+1} - t_n$. Pohybová rovnice bez uvažování tlumení v čase t_{n+1} je tvaru:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_{n+1} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1}$$

Vyjádření neznámé rychlosti a zrychlení:

$$\dot{\mathbf{U}}_{n+1} = (\mathbf{U}_{n+1} - \mathbf{U}_n) / \Delta t$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_{n+1} = (\dot{\mathbf{U}}_{n+1} - \dot{\mathbf{U}}_n) / \Delta t$$

Pomocí posuvů lze zrychlení $\ddot{\mathbf{U}}_{n+1}$ vyjádřit následovně:

$$\ddot{\mathbf{U}}_{n+1} = \frac{(\mathbf{U}_{n+1} - 2\mathbf{U}_n + \mathbf{U}_{n-1}))}{\Delta t^2}$$

Po vhodných úpravách dospějeme k systému rovnic, díky jemuž jsme schopni stanovit neznámé posuvy v čase t_{n+1} :

$$\left(\mathbf{K} + \frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \right) \cdot \mathbf{U}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1} + \mathbf{M} \cdot \frac{(2 \cdot \mathbf{U}_n - \mathbf{U}_{n-1}))}{\Delta t^2}$$

Jelikož posuvy (rychlosti, zrychlení) stanovíme pomocí rovnice pro stejný okamžik, z tohoto důvodu mluvíme o implicitní úloze. Rychlosti a zrychlení v čase t_{n+1} získáme zpětnou integrací.

Řešení dynamické úlohy pomocí implicitní algoritmu je nepodmíněně stabilní, jinými slovy, řešení je teoreticky nezávislé na volbě délky časového kroku. Nicméně řešení takovéto úlohy může být stabilní (a konvergovat), avšak může být nepřesné. Nestabilita se projeví zhroucením výpočtu u prvních kroků výpočtu.

U implicitního algoritmu v rámci jednoho časového kroku je třeba provést několik iterací, které jsou časově náročné. Z tohoto důvodu se volí co nejdelší časový krok, který vede ke snížení časové náročnosti výpočtu. Avšak velikost časového kroku je třeba volit obezřetně, aby bylo řešení přesné nebo nedošlo ke zhroucení výpočtu. [12, 13, 33]

Explicitní algoritmus

Explicitní algoritmus využívá k řešení pohybové rovnice metodu centrálních diferencí. U tohoto algoritmu se vychází z řešení pohybové rovnice pro čas t_n (nikoliv čas t_{n+1} jako u implicitního algoritmu).

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_n + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_n = \mathbf{F}_n$$

Zrychlení vyjádřeno metodou centrálních diferencí:

$$\ddot{\mathbf{U}}_n = \frac{(\mathbf{U}_{n+1} - 2\mathbf{U}_n + \mathbf{U}_{n-1}))}{\Delta t^2}$$

Dosazením zrychlení do pohybové rovnice a úpravami získáme rovnici pro posuvy v čase t_{n+1} .

$$\left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2}\right) \mathbf{U}_{n+1} = \mathbf{F}_n - \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_n + \mathbf{M} \cdot \left(\frac{2 \cdot \mathbf{U}_n - \mathbf{U}_{n-1}}{\Delta t^2}\right)$$

Posuvy v čase t_{n+1} získáme z pohybové rovnice psané pro předchozí časový krok, posuvy jsou tedy dané explicitně.

Pokud použijeme diagonální matici hmotnosti \mathbf{M} , systém rovnic se rozpadne na systém samostatných nezávislých rovnic. To vede k razantnímu urychlení času výpočtu. Nevýhodou explicitního řešiče je podmíněná stabilita algoritmu. To znamená, že stabilita je závislá na volbě délky časového kroku Δt . Je tedy nutné splnit následující podmínku:

$$\Delta t < \Delta t_{cr}$$

Kde Δt_{cr} je kritická délka časového kroku, která je daná rozměrem prvků v síti a rychlostí šíření zvuku v daném prostředí c . Ze všech prvků je třeba vybrat ten, pro který je Δt_{cr} nejmenší, a na jeho základě stanovit časový krok Δt .

$$\Delta t_{cr} = \frac{L}{c} ; c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Kde	Δt_{cr}	[s]	kritická délka časového kroku
	L	[m]	charakteristický rozměr nejmenšího prvku sítě
	c	[m/s]	rychlost šíření zvuku v daném prostředí
	E	[Pa]	Yuongův modul pružnosti v tahu
	ρ	[kg/m ³]	hustota materiálu

Takovýto časový krok může být 100 ÷ 1000 menší nežli v případě implicitního algoritmu, avšak řešení těchto krátkých kroků je několikanásobně rychlejší.

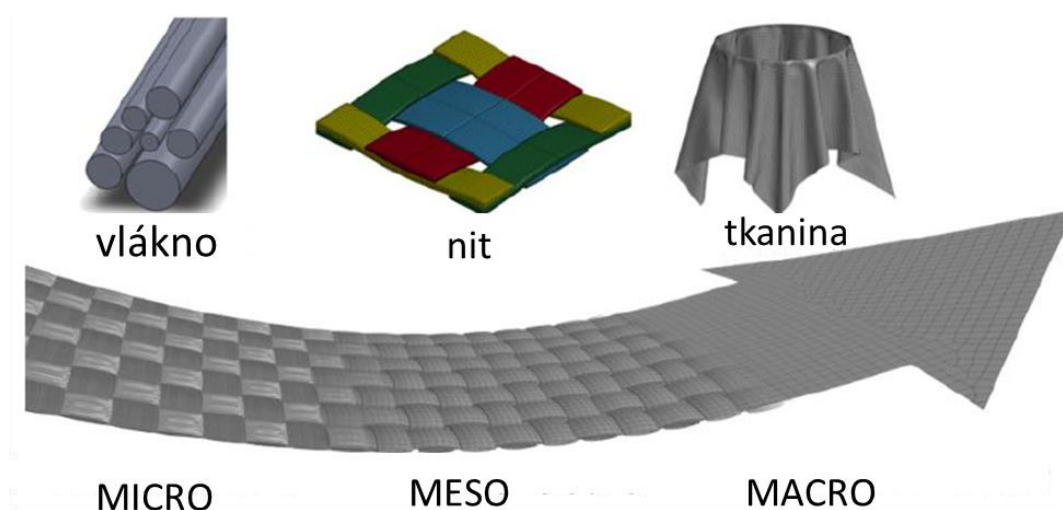
Explicitní algoritmus má využití zejména v analýzách rychlých dějů jakožto crash testy, drop testy, průstřely či exploze. Tyto problémy zahrnují veliké materiálové i

geometrické nelinearity, které lze efektivně řešit explicitním algoritmem. Explicitní algoritmus klade rovněž menší požadavky na software a hardware. [12, 13, 33]

5 Současný stav poznání

5.1 Metody výpočtového modelování tkanin

Tkanina je sama o sobě strukturně složitý útvar. Je tvořena soustavou nití, které jsou tvořeny vlákny. Z tohoto důvodu lze vytvořit výpočtový model vrstveného laminátu složeného z tkanin různými metodami. Tyto metody se od sebe liší úrovní modelování tkaniny. Metody jsou následující: MICRO, MESO, MACRO.



Obr. 5.1 Metody modelování tkanin [27]

5.1.1 MICRO metoda

U této metody modelujeme tkaninu nejvíce podrobně, a to tak, že modelujeme jednotlivá vlákna. Vlákna se nejčastěji modelují pomocí prutových elementů. Při popisu materiálových vlastností se využívají zejména lineárně elastické izotropní modely materiálu. Materiálové parametry se stanovují na základě vlastností vláken. Při použití této metody je třeba brát v potaz, že model bude tvořen velkým množstvím elementů, a tedy i časovou náročnost výpočtu.

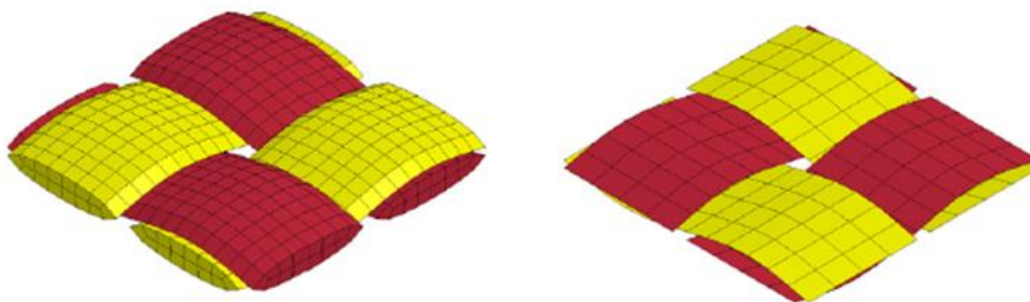
Metoda je vhodná zejména pro simulaci odezvy nitě nebo jediné vrstvy na impuls. Simulace pro více vrstev tkaniny jsou velmi časově náročné. [23, 27]



Obr. 5.2 MICRO metoda [23]

5.1.2 MESO metoda

U této metody se v modelování využívá zjednodušení, a to takového, že se modelují jednotlivé nitě. Nítě se modelují pomocí objemových nebo skořepinových elementů. Při popisu materiálových vlastností se využívají zejména lineárně elastické izotropní nebo ortotropní modely. Materiálové parametry se stanovují z experimentálních zkoušek nití, potažmo vláken. Při této metodě se zanedbává tření mezi vlákny v rámci jedné nitě. I v tomto případě je třeba počítat s modelem o vysokém počtu elementů, ovšem počet elementů bude řádově nižší než v případě MICRO metody. [20, 22, 24, 25, 27, 35]

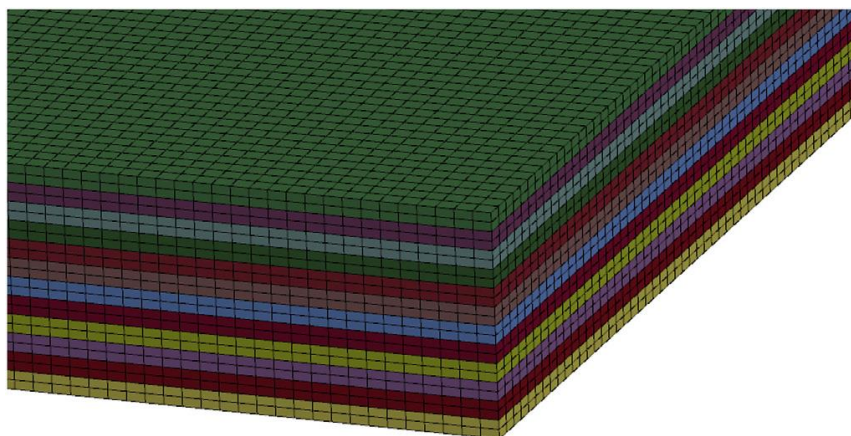


Obr. 5.3 MESO model tvořený objemovými (vlevo), skořepinovými elementy (vpravo) [35]

5.1.3 MACRO metoda

Při této metodě modelujeme tkaninu kontinuem. Model je tvořen objemovými nebo skořepinovými elementy. Využívají se zejména ortotropní modely materiálu s různými podmínkami poškození a porušení. Materiálové vlastnosti je třeba stanovit z experimentálních zkoušek tkanin, neboť jejich hodnoty jsou odlišné od materiálových vlastností vláken.

Při této metodě se zanedbává tření mezi jednotlivými vlákny a nitěmi. V případě vrstvených laminátů lze i více skutečných vrstev modelovat jednou vrstvou elementů.



Obr. 5.4 MACRO model tkaniny [26]

V porovnání s předchozími metodami, model vytvořený touto metodou obsahuje nejmenší počet elementů a časový krok výpočtu je největší. Z toho vyplývá, že tato metoda je časově nejméně náročná, a je tedy vhodná pro praktické aplikace. Metoda je rovněž mnohem jednodušší v modelování geometrie daného objektu, a to zejména u komplikovaných tvarů.

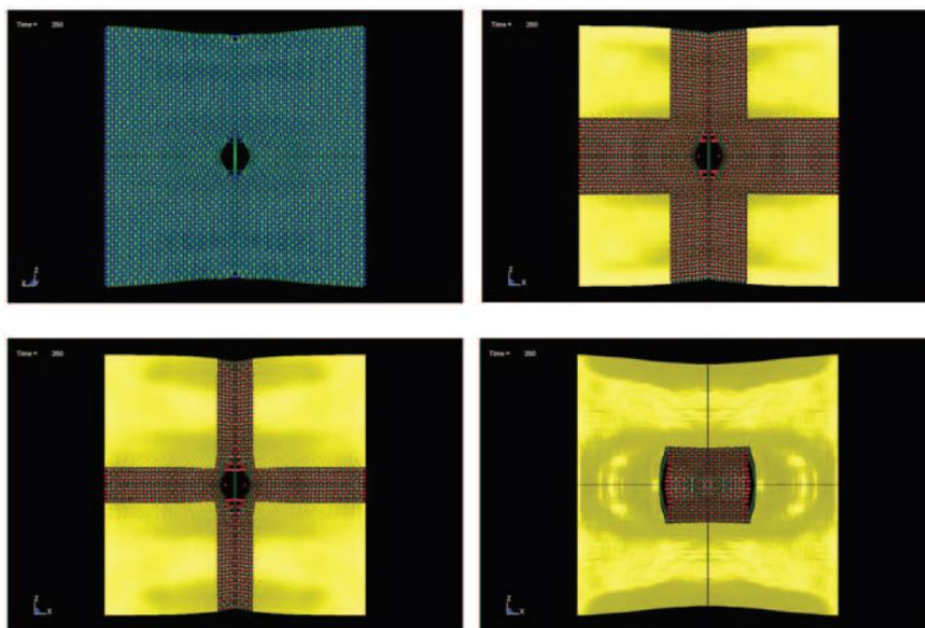
Nevýhodou této metody je to, že pro popis kontinua vyžaduje komplikovanější modely materiálu. Tyto modely často obsahují parametry, které nelze stanovit. Jejich stanovení mnohdy závisí na zkušenosti výpočtáře. Pro stanovení těchto parametrů je často nutné provést několik iterací. [20, 21, 25, 26]

5.1.4 Kombinované modely

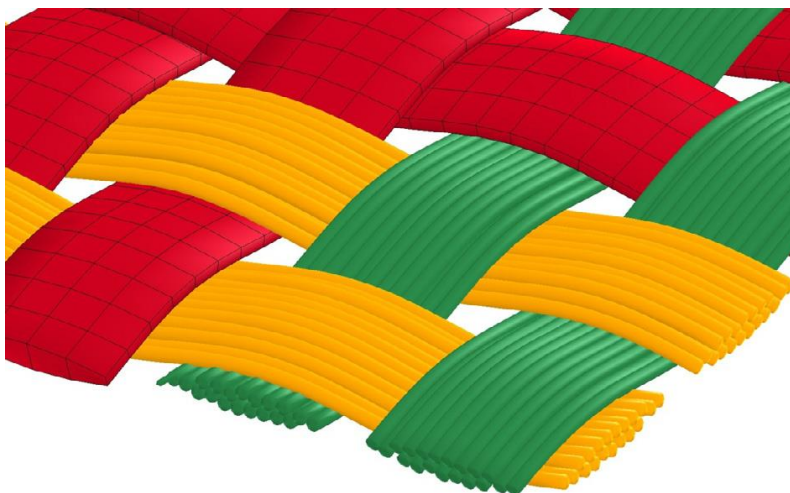
V literatuře se lze setkat i s přístupem, který kombinuje více metod. Nejčastěji se kombinuje MACRO a MESO metoda, nazývaná jako **MESO-heterogenní metoda**.

Místo terče, kde se předpokládá interakce se střelou je modelována MESO metodou, zatímco vzdálenější místa terče, kde není předpokládána interakce, je modelována metodou MACRO. Tímto se značně zredukuje počet elementů (v případě že bychom tkaninu modelovaly pouze MESO metodou). Jelikož se předpokládá porušení tkaniny pouze v místech, který je tvořen metodou MESO, odpadá stanovení parametrů porušení pro místa modelovaná metodou MACRO, které může být mnohdy problematické. Nicméně, časový krok bude pořád stejně veliký jako v případě metody MESO, z čehož vyplývá velká časová náročnost výpočtu. [21, 22, 25, 26]

Obdobným způsobem lze kombinovat i metody MICRO a MESO. [23]



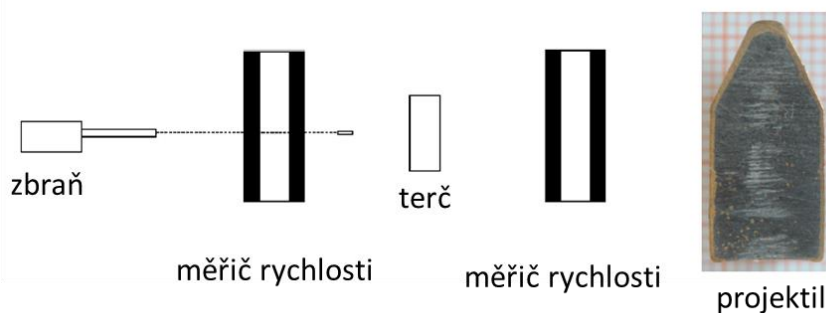
Obr. 5.5 MESO a MESO-heterogenní model tkaniny, různé varianty [21]



Obr. 5.6 kombinace metody MICRO a MESO [23]

5.2 Srovnání MESO-heterogenní a MACRO metody

Byla provedena řada studií, které srovnávají jednotlivé metody modelování. Příkladem může být následující studie, ve které se srovnávají modely vytvořené metodou MACRO a MESO-heterogenní a experimentem [25]. Modely jsou vytvořeny v prostředí LS-DYNA. Experimentem byl balistický test, kde střelou byl projektil .357 Magnum o nominální hmotnosti 10.2 g a rychlosti 430 m/s. Terčem byl panel tvořen tkaninou Kevlar® 29 a epoxidovou maticí. Panel se skládal z 14 vrstev tkaniny o celkové tloušťce 6,5 mm a rozměrech 270 x 270 mm. Panel byl uchycen mezi dva ocelové pláty se čtvercovým otvorem o rozměrech 160 x 160 mm. V rámci experimentu byla měřena dopadová a residuální rychlost projektilu.

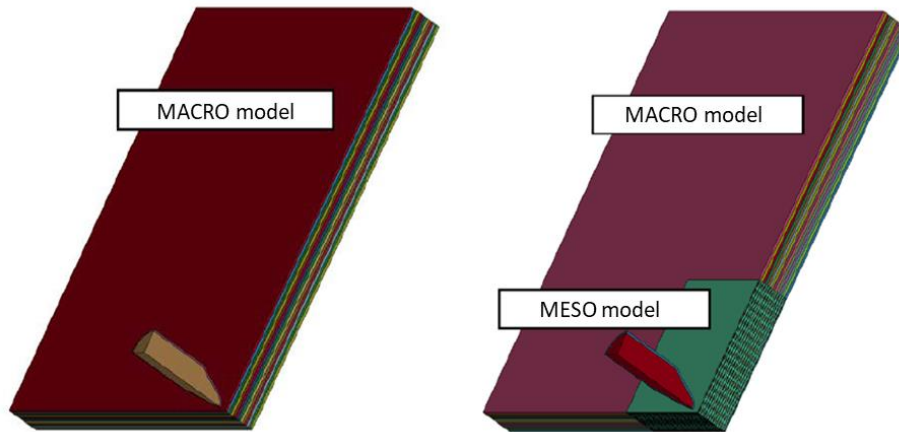


Obr. 5.7 schéma experimentu, projektil [25]

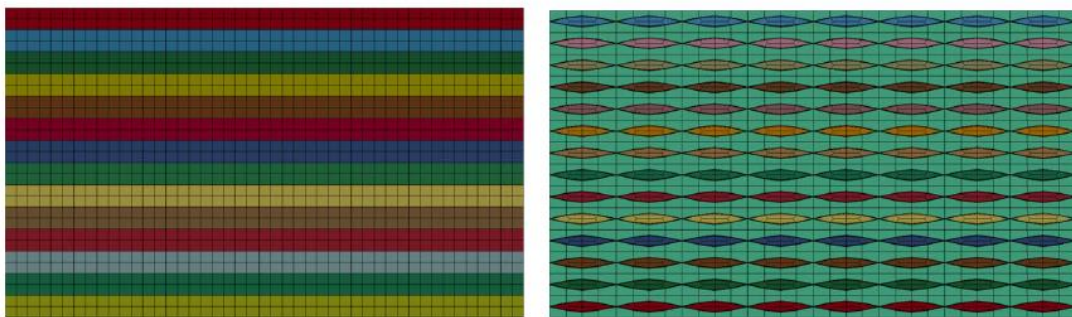
Výpočtové modely

Výpočtové modely byly vytvořeny pro centrální část panelu, která není uchycena. Byly využity dvě roviny symetrie. Po okraji, kde není rovina symetrie, je aplikovaná okrajová podmínka vetknutí.

Úloha byla modelována objemovými elementy a jejich velikost byla volena tak, aby si oba modely co nejvíce odpovídaly v počtu a velikosti elementů. V obou případech byly použity elementy s jednobodovou integrací.



Obr. 5.8 Srovnání MACRO a MESO modelu [25]



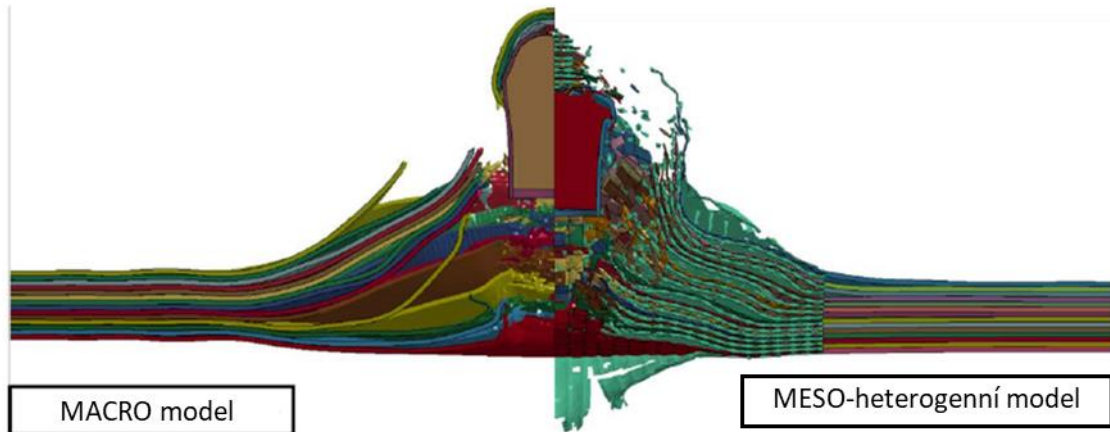
Obr. 5.9 Řez MACRO a MESO modelem [25]

MACRO model byl popsán lineárně elasticko-ortotropním modelem materiálu, který zahrnoval podmínku porušení Chang-Chang (*MAT_054 v LS-DYNA). Kohezní síly od epoxidové matrice byly modelovány pomocí tuhého kontaktu s kritickou hodnotou porušení.

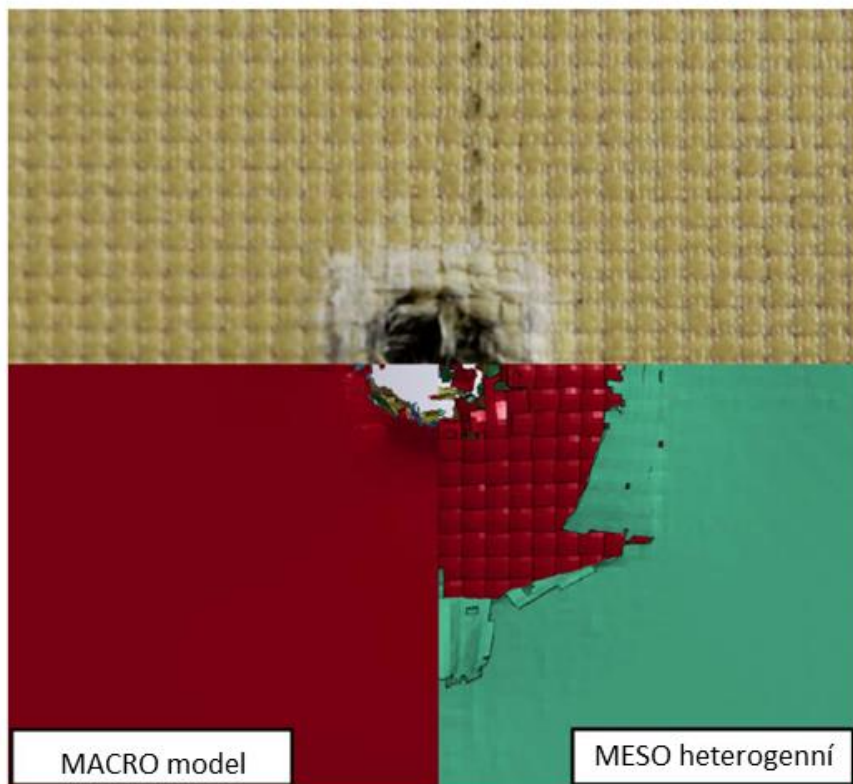
MESO model byl popsán lineárně elastickým izotropním modelem materiálu a byl doplněn o podmínku porušení, kterou byla kritická hodnota prvního hlavního napětí. Interakce mezi nitěmi a matricí byla modelována pomocí tuhého kontaktu s kritickou hodnotou porušení.

Srovnání výpočtových modelů a experimentu

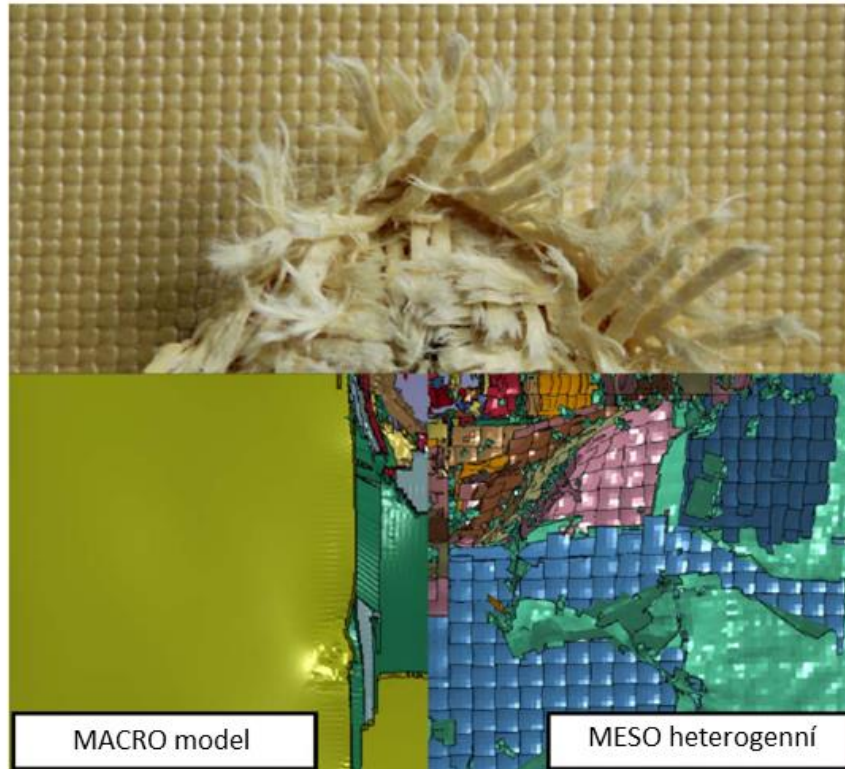
Na následujících obrázcích je možné vidět srovnání výpočtových modelů a experimentu.



Obr. 5.10 Srovnání MACRO a MESO-heterogenního modelu [25]



Obr. 5.11 Srovnání experimentu, MACRO a MESO-heterogenního modelu; čelní strana [25]



Obr. 5.12 Srovnání experimentu, MACRO a MESO-heterogenního modelu; zadní strana [25]

Srovnáním výpočtových modelů a experimentu lze konstatovat tyto fakta:

- Oba modely jsou schopny popsat porušení vláken a delaminaci.
- Residuální rychlost v případě MACRO metody byla vyšší o 17 % oproti experimentu, v případě MESO-heterogenní metody byla vyšší o 11 %.
- Výpočet pro MACRO metodu byl 3x rychlejší.

V literatuře lze dohledat více studií, které srovnávají metody výpočtového modelování balisticky odolných tkanin. Vždy se dospělo k závěru, že MESO metoda vykazuje lepší shodu s experimentem oproti MACRO metodě. Nicméně časová náročnost pro MESO metodu je řádově vyšší nežli pro MACRO metodu. [22, 26]

6 Simulační prostředí LS-DYNA

Mezi nejrozšířenější software pro řešení simulací vysoce rychlých dějů patří LS-DYNA, jež je produktem americké společnosti LSTC (Livermore software technology corporation). Počátky tohoto softwaru se datují od roku 1976, tehdy ještě pod názvem DYNA3D. [14]

LS-DYNA je robustní konečno-prvkový program určený pro řešení vysoce rychlých dějů, avšak je možné s ním řešit i statické nebo modální analýzy. Pomocí tohoto programu lze simulovat komplexní úlohy jakožto děje s velikými deformacemi, termální analýzy, elektromagnetické analýzy, interakce těles s tekutinou, či proudění nestlačitelných i stlačitelných látek. Jeho využití je zejména v automobilovém, leteckém, vojenském a konstrukčním průmyslu. Tento program je určen především pro řešení rychlých fyzikálních dějů, ve kterých dochází k silným nelinearitám. Velkými nelinearitami se v tomto případě rozumí veliké deformace, změnu okrajových podmínek v průběhu děje či nelineární materiál. Mezi takovéto děje patří nárazové zkoušky automobilů (crash test), pádové zkoušky (drop test), balistické zkoušky jakožto interakce projektilu a pancíře, či exploze. [14, 33]

LS DYNA zahrnuje širokou škálu elementů, jakožto prutové, diskrétní, skořepinové, objemové, či SPH (smooth particle hydrodynamice) nebo DEM elementů (discrete element metod), a jiné. Dále tento software nabízí celou řadu různých modelů materiálů: kovy, plasty, keramika, kompozity, gumy, tkaniny, dřevo nebo uživatelem definovaný materiál. [14, 33]

6.1 Modely materiálu vhodné pro tkaniny v LS-DYNA

Pro modelování tkanin v LS-DYNA lze využít několik modelů materiálů. Níže jsou popsány vybrané modely materiálu, které jsou v rámci této práce využity pro modelování aramidové tkaniny.

6.1.1 *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC (MAT_002)

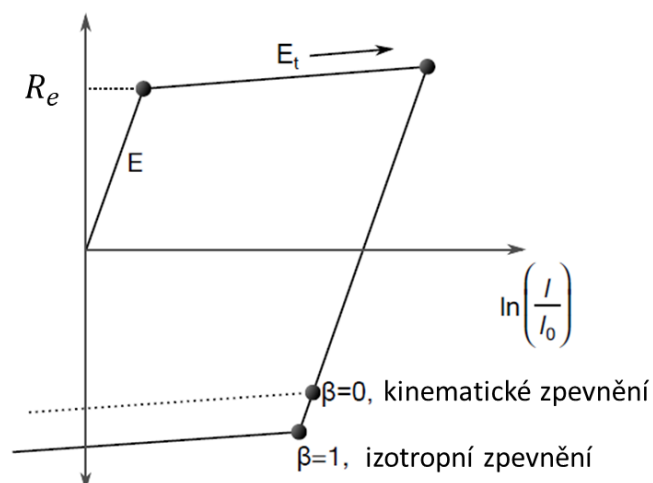
Jedná se o základní model pro modelování lineárně elasticko-ortotropního chování. Model je použitelný pro skořepinové a objemové prvky. Chování materiálu je popsáno příslušným tenzorem tuhosti (kap. 4.3.2).

Tento model neobsahuje podmínky porušení. Pokud tedy chceme zahrnout i poškození, je nutné tyto podmínky dodat.

6.1.2 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003)

Jedná se o základní bilineární model pro elasto-plastického izotropního chování materiálu. Jedná se o robustní model, který je vhodný pro děje s vysokými rychlostmi deformace. Model zahrnuje parametr plastického zpevnění, pomocí kterého lze přecházet plynule mezi kinematickým a izotropním zpevněním (Obr. 6.1). Dále je zahrnuta podmínka porušení v podobě kritické hodnoty efektivního plastického přetvoření.

Model je schopen popsat zpevnění materiálu s ohledem na rychlost přetvoření. Toho je docíleno použitím Cowper-Symondsova modelu. [30]



Obr. 6.1 Bilineární elasto-plastické chování s kinematickým a izotropním zpevněním [30]

6.1.3 *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE (*MAT_054)

Model určený pro ortotropní materiály. Zahrnuje model poškození a porušení Chang-Chang. Model dokáže zohlednit jednosměrnou nebo dvousměrnou vláknitou strukturu. Model umožňuje zahrnutí zpevnění materiálu vlivem rychlosti přetvoření. Tohoto je docíleno přiřazením jednotlivých pevností pro danou rychlost přetvoření. [30]

Model porušení Chang-Chang

Pokud budeme uvažovat dvousměrnou vláknitou strukturu, model porušení Chang-Chang zahrnuje tři módy porušení. Porušení závisí na kritické hodnotě napětí. Pro každý směr vláken lze zapsat vlastní kritickou hodnotu. Porušení nastane, je-li splněna alespoň jedna z následujících podmínek.

- Tahové porušení vláken

$$\sigma_{aa} > 0 \rightarrow e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1; e_f^2 \geq 0 \rightarrow \text{porušení}$$

- Tlakové porušení vláken

$$\sigma_{aa} < 0 \rightarrow e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 - 1; e_c^2 \geq 0 \rightarrow \text{porušení}$$

- Porušení matrice

$$\sigma_{ab} \neq 0 \rightarrow e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1; e_f^2 \geq 0 \rightarrow \text{porušení}$$

Vysvětlení parametrů

$\sigma_{aa}; (\sigma_{bb})$ - napětí ve směru vláken

σ_{ab} - smykové napětí

$X_t; (Y_t)$ - pevnost tkaniny v tahu ve směru vláken

$X_c; (Y_c)$ - pevnost tkaniny v tlaku ve směru vláken

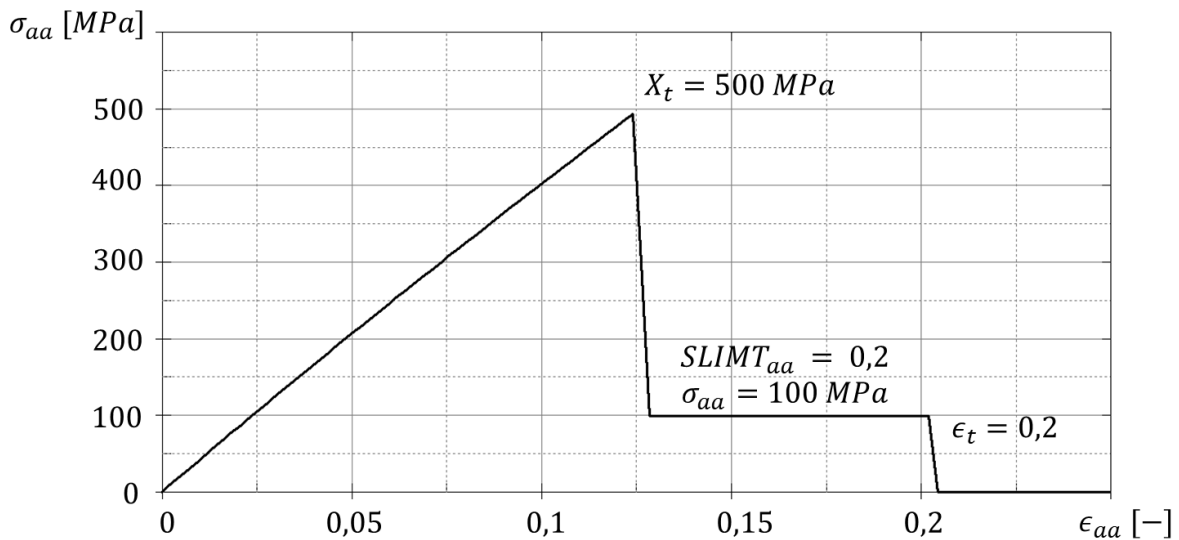
S_c - pevnost ve smyku

β - váhový parametr ($0 \leq \beta \leq 1$)

Model poškození

Je-li model poškození zahrnut, funguje následujícím principem. Dojde-li ke splnění některé z výše uvedených podmínek pro poškození, potom daný element není vymazán, ale tzv. degeneruje. Hodnota maximálního napětí může dosáhnout pouze hodnoty, která je dána příslušným součinitelem.

$$\sigma_{aa} = SLIMT_{aa} \cdot X_t; SLIMT_{aa} - \text{součinitel pro stanovení napětí po poškození}$$

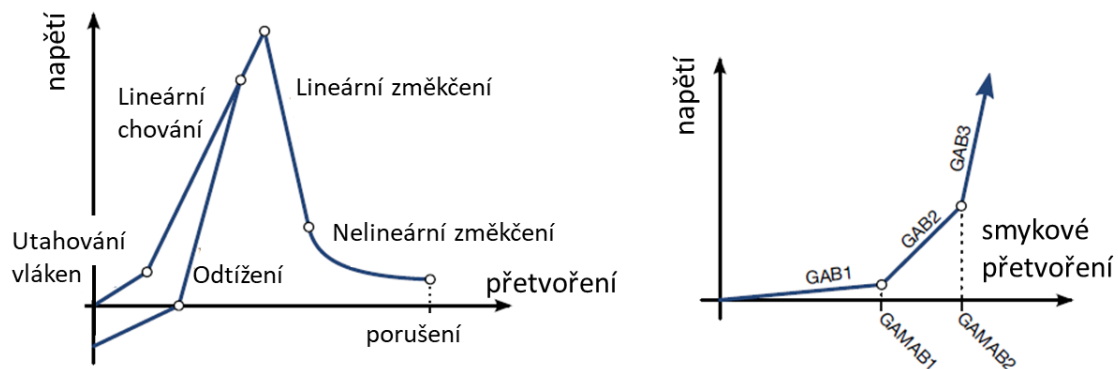


Obr. 6.2 Chování modelu MAT_054 při jednoosém tahovém zatížení

K vymazání elementu (porušení) dojde v případě, že některá z hodnot přetvoření dosáhne kritické hodnoty, a to sice maximální přetvoření vláken v tahu, maximální přetvoření vláken v tlaku nebo efektivní přetvoření. [30]

6.1.4 *MAT_DRY_FABRIC (MAT_214)

Tento model je vyvinut pro modelování vysokopevnostních tkanin. Je navrhnutý především pro aplikace, ve kterých je nutné absorbovat velké množství energie. Model je určen pro membránové prvky. Chování je popsáno na základě křivek jednoosé tahové zkoušky (Obr. 6.3), přičemž pro každý směr (osnova, útek) je možné zadat samostatnou křivku. Křivka zohledňuje počáteční natahování zvlněných vláken. Smykový modul G_{ab} je popsán po částech lineární závislosti (Obr. 6.3). Model zohledňuje počáteční „utahování“ vláken, což je modelováno sníženou hodnotu tuhosti v počátečním stádiu zatěžování.



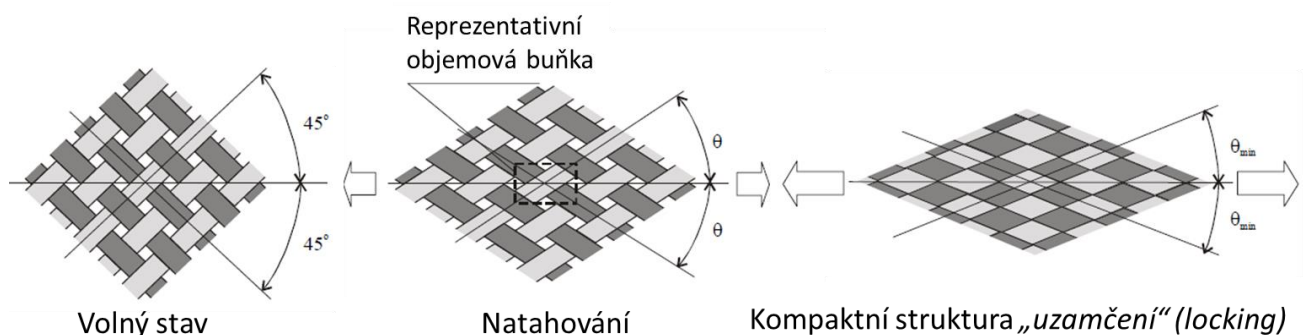
Obr. 6.3 křivka $\sigma - \epsilon$ (vlevo), $\tau - \gamma$ (vpravo) pro *MAT_DRY_FABRIC [30]

Model zahrnuje podmínku poškození, a to sice kritickou hodnotu přetvoření ve směru A i B (ϵ_{a_max} , ϵ_{b_max}). Dojde-li k dosažení této hodnoty materiál postupně degraduje. Porušení nastane v případě, dosáhne-li přetvoření v směru A, B nebo maximální přetvoření kritické hodnoty (každému přetvoření přísluší samostatná kritická hodnota).

Model je schopen popsat zpevnění materiálu na základě rychlosti deformace. Toho je docíleno použitím Cowper-Symondsova modelu. [30]

6.1.5 *MAT_MICROMECHANICS_DRY_FABRIC (MAT_235)

Pro popis chování materiálu vychází tento model z mikro-mechanické struktury tkaniny a tenzoru tuhosti pro lineárně ortotropní elastický materiál. Flexibilního chování je docíleno díky sníženému smykovému modulu v nezátženém stavu. V případě dostatečně veliké deformace nastane tzv. fáze *uzamčení (locking)*, následně se model chová jako elastické kontinuum (Obr. 6.4).



Obr. 6.4 Znárodnění flexibilního chování a fáze uzamčení [30]

Model obsahuje podmínku porušení maximálního napětí nebo přetvoření, přičemž může být použita pouze jedna. Model neumožňuje zadat podmínku porušení zvlášť pro každý směr. [30]

6.2 Podmínky porušení

Modelujeme-li namáhání materiálu, při kterém dojde k jeho tzv. porušení (příkladem může být jednoosá tahová zkouška, kdy dojde k přetržení vzorku), je třeba tento podstatný fakt zahrnout do výpočtového modelu. Toho se docílí zahrnutím modelu nebo podmínky porušení. Porušení nastane, je-li splněna některá podmínka porušení. Porušení je nejčastěji interpretováno smazáním elementu, ve kterém byla splněna příslušná podmínka porušení. Smazání elementu vede ke skokovému uvolnění

energie a ztrátě hmoty, což může v určitých případech způsobovat nestabilitu výpočtového modelu. [30, 33, 37]

Mnoho modelů materiálu v LS-DYNA nemají přímo implementovanou podmínku porušení. Avšak často je nutné zahrnout podmínku porušení do výpočtového modelu. Z tohoto důvodu LS-DYNA umožňuje zadat podmínku porušení nezávisle na modelu materiálu. Lze rovněž kombinovat více podmínek. Pro názornost jsou vypsané některé podmínky. [30]

- První hlavní napětí - σ_1
- Ekvivalentní napětí - σ_{VM}
- Maximální efektivní přetvoření

$$\epsilon_{ef} = \sum_{ij} \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^{dev} \epsilon_{ij}^{dev}}$$

- Objemové přetvoření

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$$

- Tenzorové smykové přetvoření

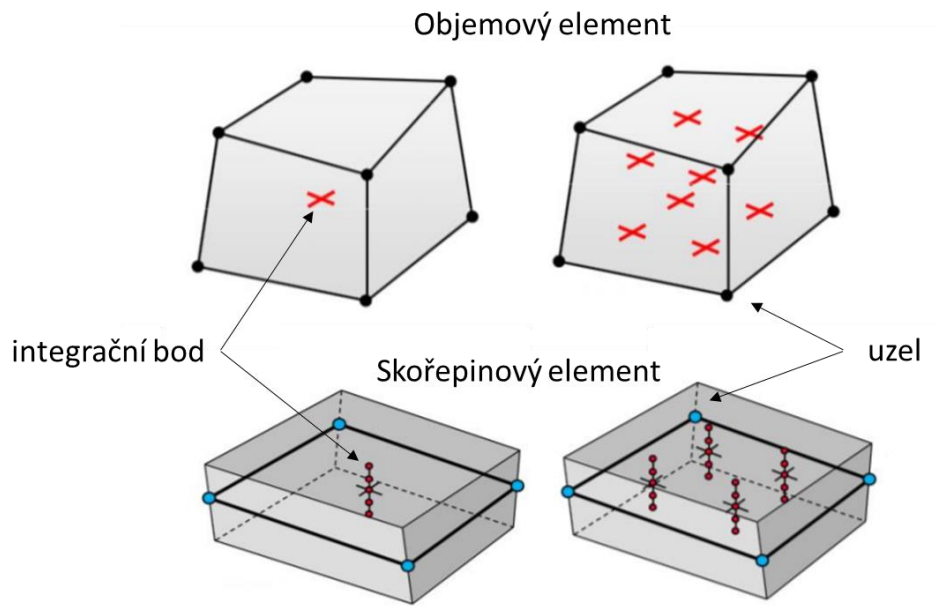
$$\epsilon_{ef} = \sum_{ij} \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^{dev} \epsilon_{ij}^{dev}}$$

6.3 Vybrané elementy v LS-DYNA

LS-DYNA obsahuje řadu elementů pro modelování nejrůznějších úloh. Pro modelování tkanin se nabízí objemové (SOLID) a skořepinové (SHELL) prvky. V LS-DYNA je nutné každému elementu přiřadit tzv. formulaci. S formulací úzce souvisí počet integračních bodů. Integrační bod lze chápat jako místo, ve kterém bude vyčíslena napjatost a jiné. Z pravidla se vyskytují prvky s plnou nebo redukovanou (jednobodovou) integrací (Obr. 6.5). U skořepinových elementů se dále zavádí se počet integračních bodů přes tloušťku (NIP). Počet se volí v závislosti na typu elementu a vlastnostech materiálu. [28, 29]

- NIP = 1 ... membránová skořepina
- NIP = 2 ... lineární materiál
- NIP = 3 a více ... nelineární materiál

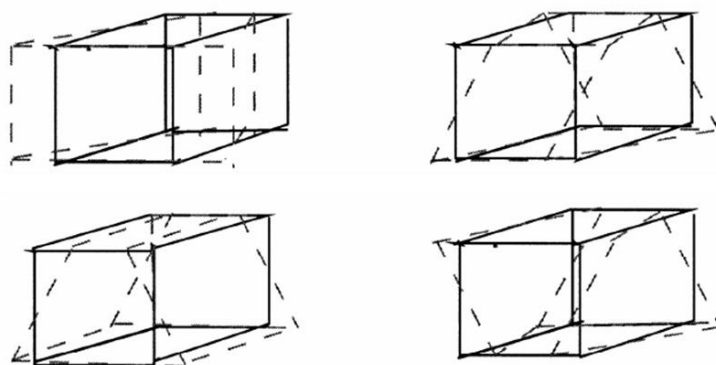
Pozn.: máme-li skořepinový prvek s plnou integrací a pěti integračními body přes tloušťku, element má tedy 20 integračních bodů ($5 \cdot 4 = 20$).



Obr. 6.5 Integrační body, redukovaná (vlevo), plná integrace elementu (vpravo) [31]

Hourglass

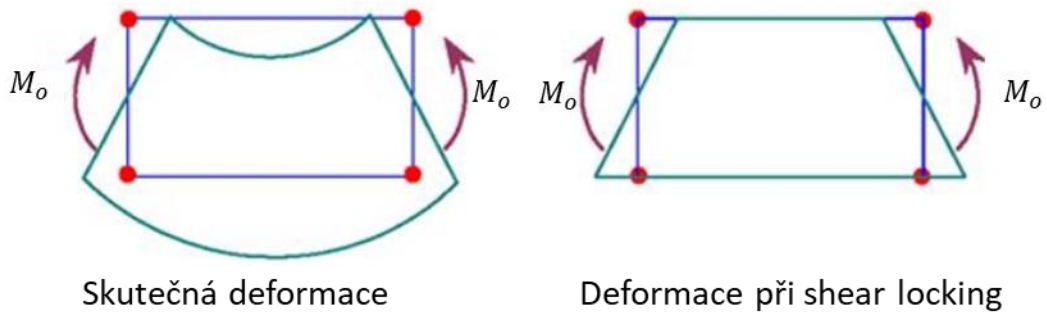
Z důvodu zkrácení výpočtového času se v explicitních výpočtech využívají prvky s redukovanou integrací. Nevýhodou takovýchto elementů je možnost výskytu tzv. hourglass módu neboli módu nulové energie. Tímto je myšleno, že dojde k deformaci elementu bez změny vnitřní energie elementu (Obr. 6.6). Toto může nastat u objemových a skořepinových elementů s jednobodovou integrací. LS-DYNA nabízí hourglass kontrolu, která omezuje vznik módu nulové energie. [28, 29]



Obr. 6.6 Znáznornění hourglass módu u objemových prvků [28]

Shear locking

Tenkostěnná tělesa se převážně modelují pomocí skořepinových elementů, avšak je možné je modelovat rovněž pomocí objemových elementů. Nicméně takovéto elementy mohou mít špatný poměr stran a může docházet k jevu zvaného „**shear locking**“. Tímto je myšleno, že při čistě ohybovém namáhání vzniká nežádoucí smyková energie (Obr. 6.7). Z tohoto důvodu LS-DYNA nabízí elementy, které redukují tento efekt. [28, 29]



Obr. 6.7 Shear locking [32]

7 Materiál, materiálové zkoušky a experimenty

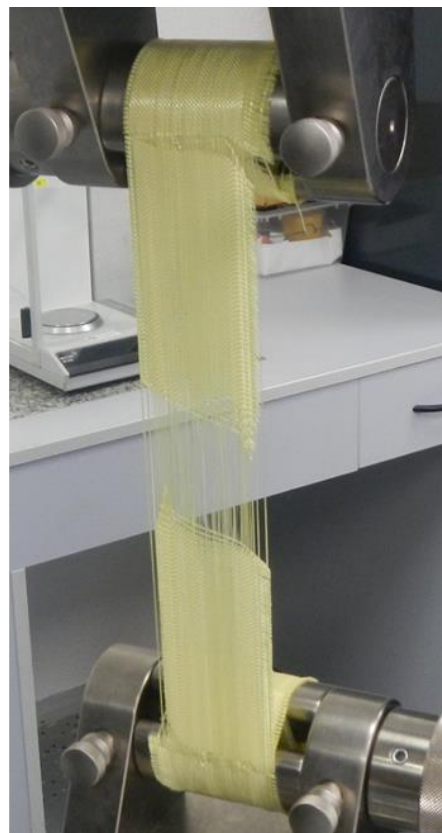
Předmětem výpočtového modelování je aramidová tkanina o tloušťce $t = 0,17 \text{ mm}$ a plošné hustotě $\rho_s = 0,12 \text{ kg/m}^2$. Pro tuto tkaninu byly vykonané následující zkoušky a experimenty.

7.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla realizovaná pro oba směry vláken (útek a osnova), vždy pro tři vzorky. Zkoušky byla vykonány na univerzálním stroji INSTRON 5985 a dle normy ČSN ISO 13934-1. Hodnoty naměřených veličin jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 7.1).

Tabulka 7.1 Mechanické vlastnosti aramidové tkaniny

Směr vláken	Modul pružnosti v tahu E_i [GPa]	Pevnost v tahu σ_{max} [MPa]	Maximální síla F_{max} [N]	Tažnost při F_{max} [%]
Útek	$7,40 \pm 0,77$	500 ± 31	4700 ± 584	$11,0 \pm 1,7$
Osnova	$3,95 \pm 0,02$	292 ± 15	2800 ± 347	$13 \pm 1,8$



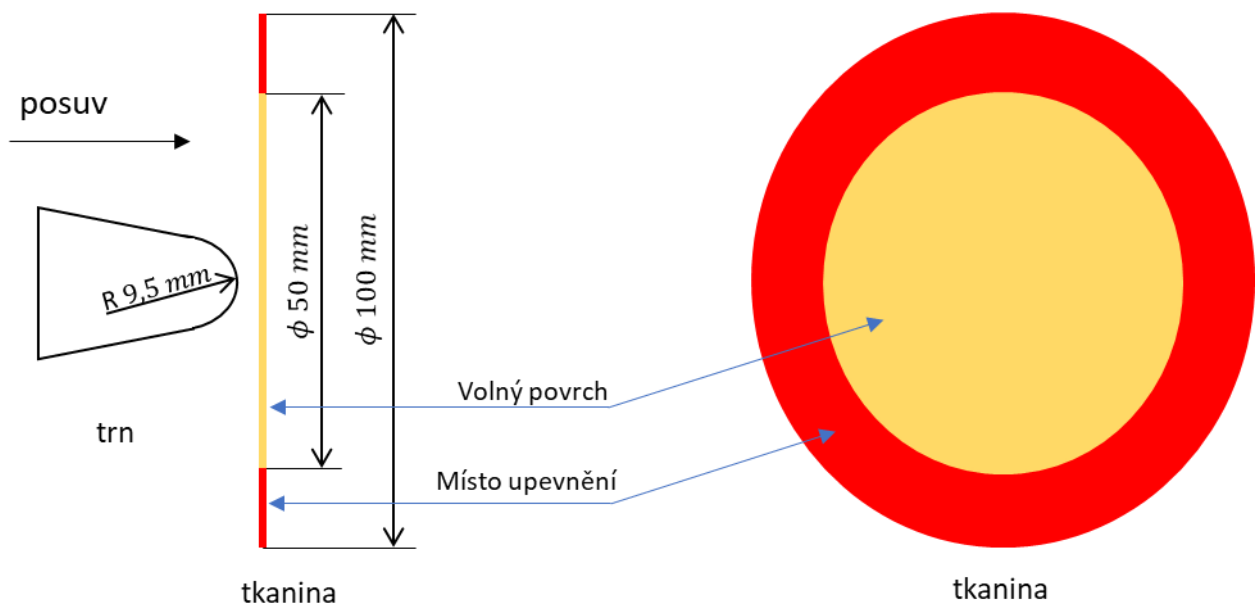
Obr. 7.1 Tahová zkouška tkaniny, nezátěžený stav (vlevo), tkanina na konci zkoušky (vpravo)

7.2 Zkouška protlačení kulovým trnem

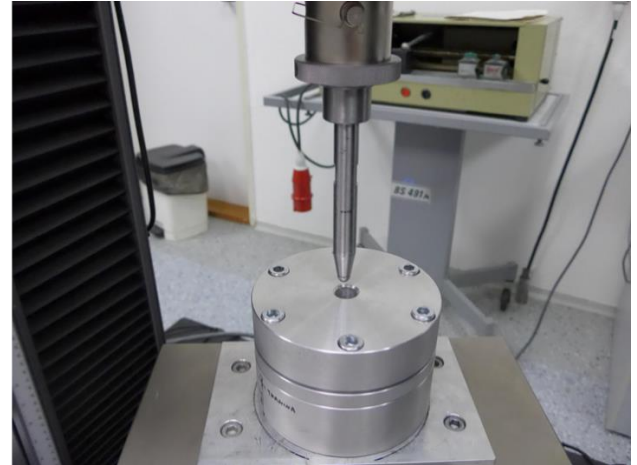
Princip této zkoušky je následující. Kus tkaniny je pevně upnut do kruhového rámu a středem je protlačován trn se sférickým hrotem o poloměru $R = 9,5 \text{ mm}$. Trn je vyroben z tvrdokovu. Zkouška byla klasifikována jako kvazi-statická. Během protlačování je měřena síla, která působí na trn. Trn je protlačován dostatečně dlouhou dobu, aby došlo k protržení tkaniny. Cílem experimentu je stanovení síly a posuvu trnu v okamžiku protržení. Zkouška byla realizovaná pro tři vzorky. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 7.2).

Tabulka 7.2 Výsledky protlačovací zkoušky

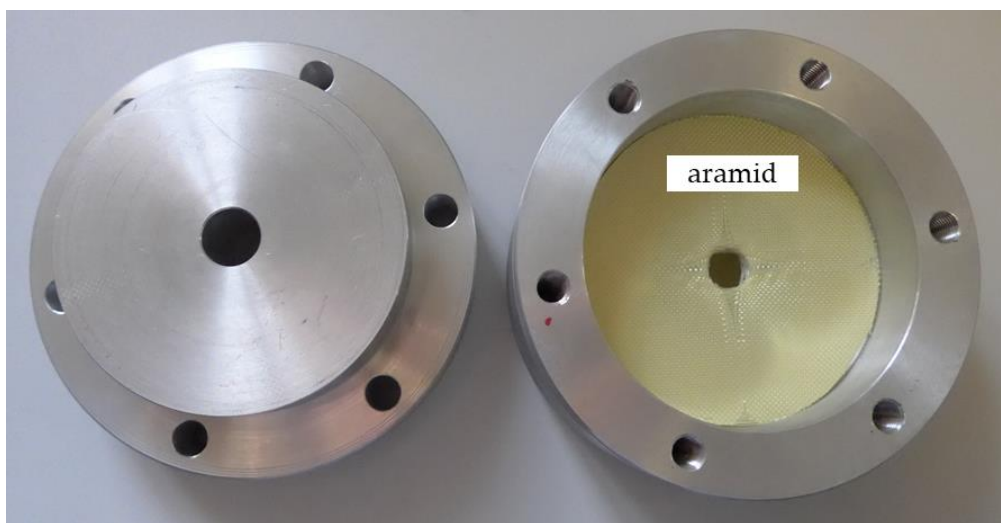
Číslo zkoušky	Síla F_{max} [N]	Posuv u [mm]
1	884	7,2
2	884	7,4
3	814	7,7



Obr. 7.2 Schéma zkoušky protlačení kulovým trnem



Obr. 7.3 aparatura pro zkoušku protlačení trnem



Obr. 7.4 upevňující aparatura a tkanina po protřetí

Pro tuto zkoušku bude vytvořen výpočtový model, který bude využit pro optimalizaci materiálových parametrů výpočtového modelu.

7.3 Střelecká zkouška do balistické plastelíny

Cílem této zkoušky je posouzení balistické odolnosti laminátu. Zkouška probíhá následujícím způsobem. Za terč, který je tvořen několika vrstvami tkaniny (měkká ochrana), je umístěna speciální plastelína. Do terče je následně vystřelen projektil dle daných požadavků. Při vyhodnocení se stanoví, zda došlo k průstřelu (perforaci), a změří se hloubka vtisku v plastelíně (Obr. 7.5).

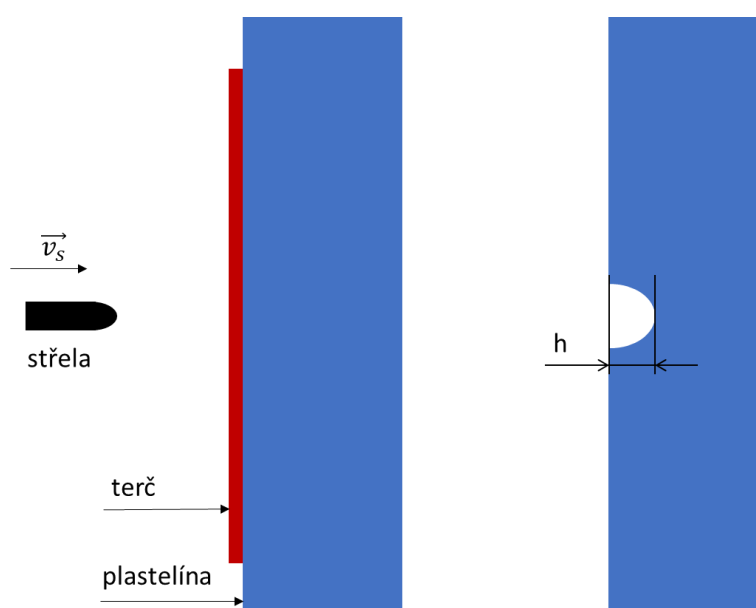
Tato zkouška byla vykonána pro 60 vrstev tkaniny a projektil ráže .44 Magnum SJHP. Rychlost střely byla měřena před dopadem na terč. Celkem byly provedeny dvě

zkoušky, přičemž v žádném případě nedošlo k průstřelu (perforaci). Výsledky zkoušek jsou v následující tabulce (Tabulka 7.3).

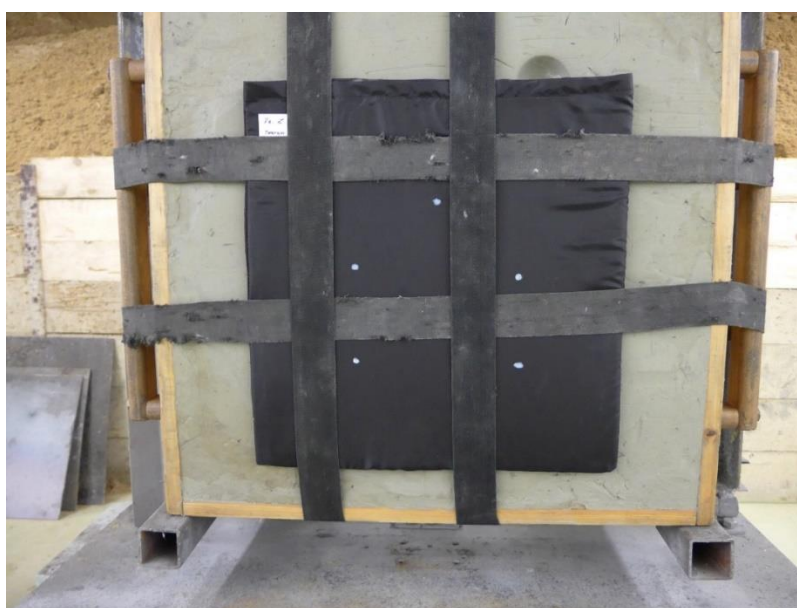
Tabulka 7.3 Výsledky střelecké zkoušky

Číslo zkoušky	Rychlost střely \vec{v}_s [m/s]	Hloubka vtisku h [mm]
1	435,6	39,6
2	433,7	41,0

Tato zkouška slouží především k validaci výpočtového modelu. Pro tuto zkoušku bude vytvořen výpočtový model, který bude následně srovnán s experimenty.



Obr. 7.5 schéma střelecké zkoušky, měření hloubky vtisku h



Obr. 7.6 střelecká zkouška

8 Vývoj výpočtového model

Během vývoje výpočtového modelu balisticky odolného laminátu bude využito a posouzeno MESO a MACRO metody modelování tkaniny. V případě MACRO metody bude využito více modelů materiálu.

Během vývoje výpočtového modelu bude uplatněn následující postup.

1. Stanovení materiálových parametrů na základě tahových zkoušek, potažmo dostupné literatury.
2. Simulace zkoušky protlačení kulovým trnem. Na základě této zkoušky budou optimalizované materiálové parametry, včetně podmínek porušení.
3. Simulace interakce jedné vrstvy tkaniny se střelou v rozsahu rychlostí 0 – 500 m/s . Smyslem této simulace je posouzení chování modelu pro různé rychlosti projektilu. Dále na základě této simulace mohou být optimalizovány materiálové parametry.
4. Simulace interakce deseti vrstev tkaniny se střelou v rozsahu rychlostí 0 – 1000 m/s . Smyslem této simulace je posouzení chování modelu pro různé rychlosti projektilu. Dále na základě této simulace mohou být optimalizovány materiálové parametry.

Pozn.: Pokud budou v kroku 3 nebo 4 optimalizovány materiálové parametry, bude model muset znovu projít celým cyklem výše uvedeného postupu

Vybraný model, který se prokáže jako vhodný pro modelování tkaniny při interakci s projektilem, bude podroben validaci (Kap. 9.1). Validací bude simulace střelby do balistické plastelíny, pro kterou jsou dostupná experimentální data (Kap. 7.3). Výpočtový model bude poté aplikován pro praktický výpočet (Kap. 9.2).

Požadavky

Výpočtový model tkaniny by měl splnit následující požadavky:

- reflektovat chování tkaniny při interakci se střelou s rychlostí 0 až 1000 m/s
- použitelný pro různé druhy projektilů
- doba výpočtu by se měla pohybovat v rozumných mezích.

Řešič

Interakci střely a terče lze klasifikovat jako rychlý děj, jelikož rychlost střely může dosahovat hodnoty až 2000 m/s . Při takovýchto rychlostech hrají zásadní roli setrvačné účinky hmoty. Dále při interakci dochází k velikým deformacím a porušování materiálu. Z těchto důvodů bude problém řešen prostřednictvím explicitního řešiče LS-DYNA.

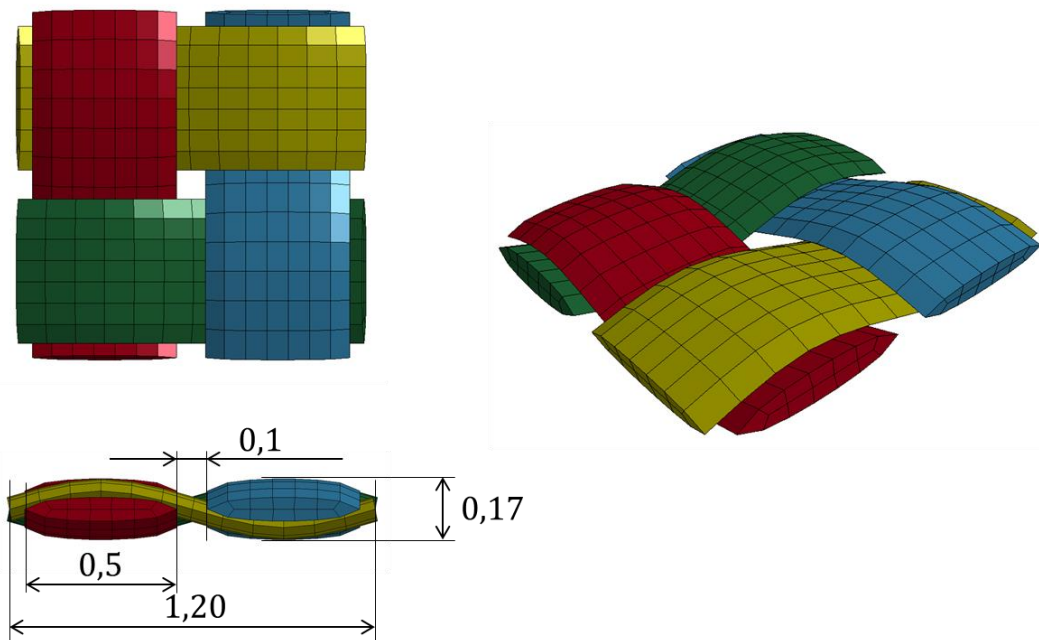
8.1 MESO metoda

8.1.1 Simulace zkoušky protlačení trnem

MKP model

Nejprve byl vytvořen CAD model tkaniny. Výška modelu byla daná tloušťkou vrstvy tkaniny. Jelikož nebyly známy zbylé rozměry struktury tkaniny, byly tyto rozměry stanoveny s ohledem na výšku tkaniny a na rozměry v dostupné literatuře [21]. Následně byl model diskretizován. Nítě jsou modelované objemovými prvky s redukovanou integrací. Model je tvořen 1 534 938 uzly a 917 625 elementy.

Při interakci tkaniny a trnu dochází ke kontaktu pouze s kulovou plochou, tudíž je trn modelován jako koule. Trn je tvořen objemovými elementy.



Obr. 8.1 Síť a základní rozměry

Modely materiálu

Pro nítě je použit lineárně elasticko ortotropní model materiálu (*MAT_002). Dále je zahrnuta podmínka porušení v podobě **maximálního hlavního napětí σ_1** . Materiálové parametry byly stanoveny na základě dostupné literatury [21] (Tabulka 8.1). Směr *a* je shodný s podélným směrem vláken.

Tabulka 8.1 Materiálové parametry pro MESO model

E_a [GPa]	$E_b = E_c$ [GPa]	$G_{ab} = G_{bc} = G_{ac}$ [GPa]	$\mu_{ab} = \mu_{bc} = \mu_{ac}$ [-]
62	0,62	0,126	0,01

$$\sigma_1 = 3,4 \text{ GPa}$$

$$\rho = 1310 \text{ kg/m}^3$$

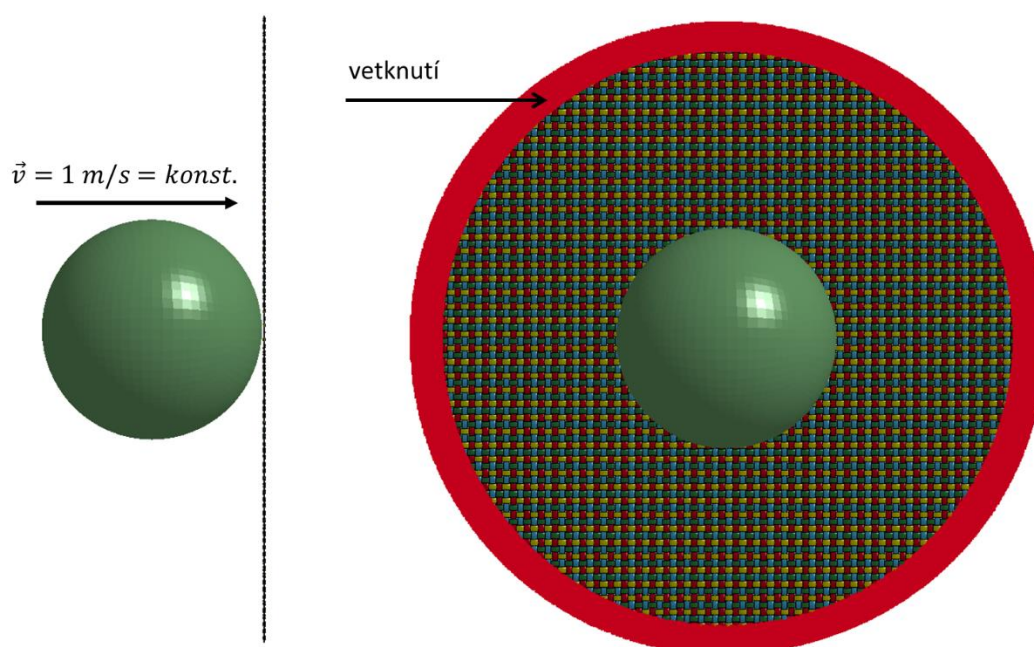
Tuhost trnu je několikanásobně vyšší nežli tuhost tkaniny, tudíž je trn modelován jako tuhé těleso (*MAT_RIGID).

Kontakt

Je zahrnut kontakt se třením mezi jednotlivými nitěmi, a mezi nitěmi a trnem. Hodnota statického f_s a dynamického f_d součinitele tření je $f_s = f_d = 0,2$. Tyto hodnoty vychází z dostupné literatury [21, 25, 26, 36].

Okrajové podmínky

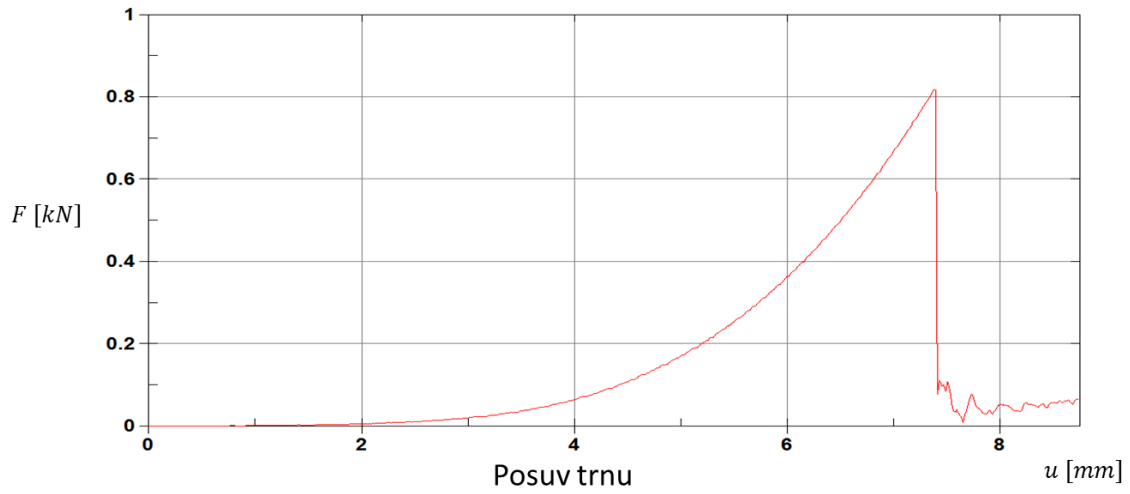
V místě uchycení tkaniny je předepsaná okrajová podmínka vetknutí. Trnu je předepsaná konstantní rychlost během celého děje, a to 1 m/s.



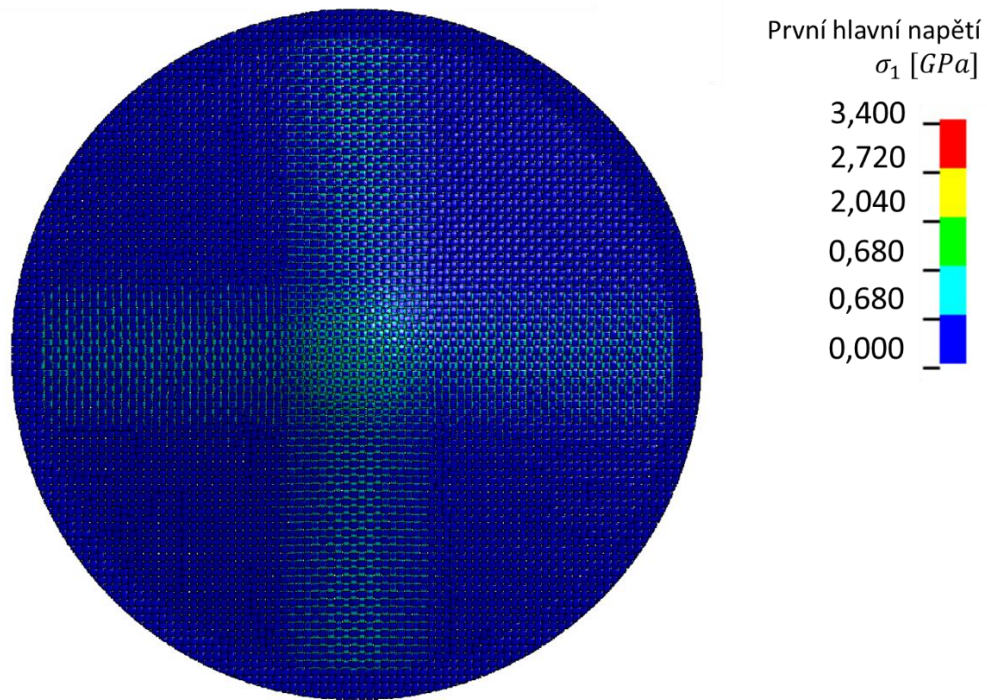
Obr. 8.2 okrajové podmínky

Analýza výpočtového modelu

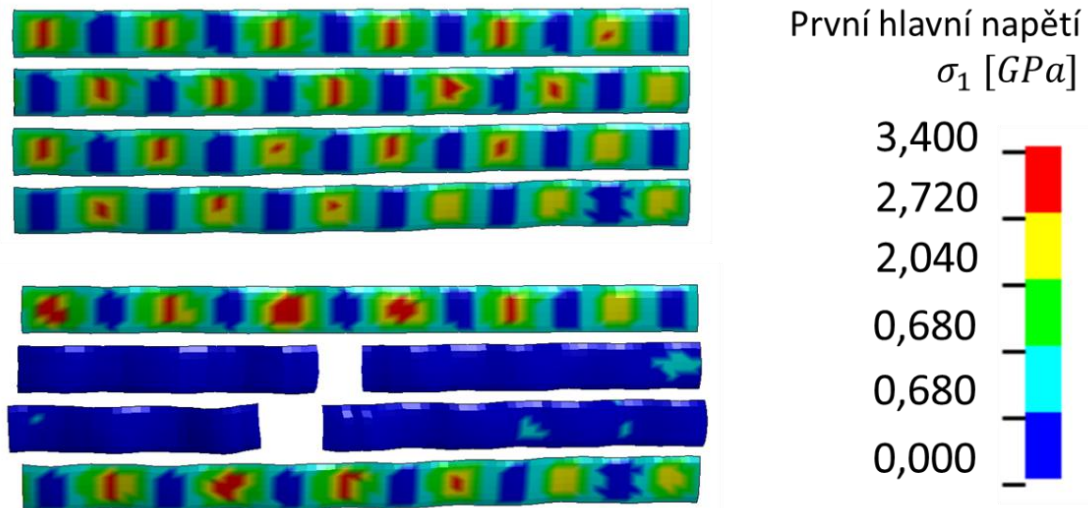
Průběh síly mezi tkaninou a trnem je vykreslena na základě součtu kontaktních sil mezi jednotlivými nitěmi a trnem (Obr. 8.3). K protržení tkaniny došlo při posuvu $u = 7,4 \text{ mm}$ síle $F = 814 \text{ N}$.



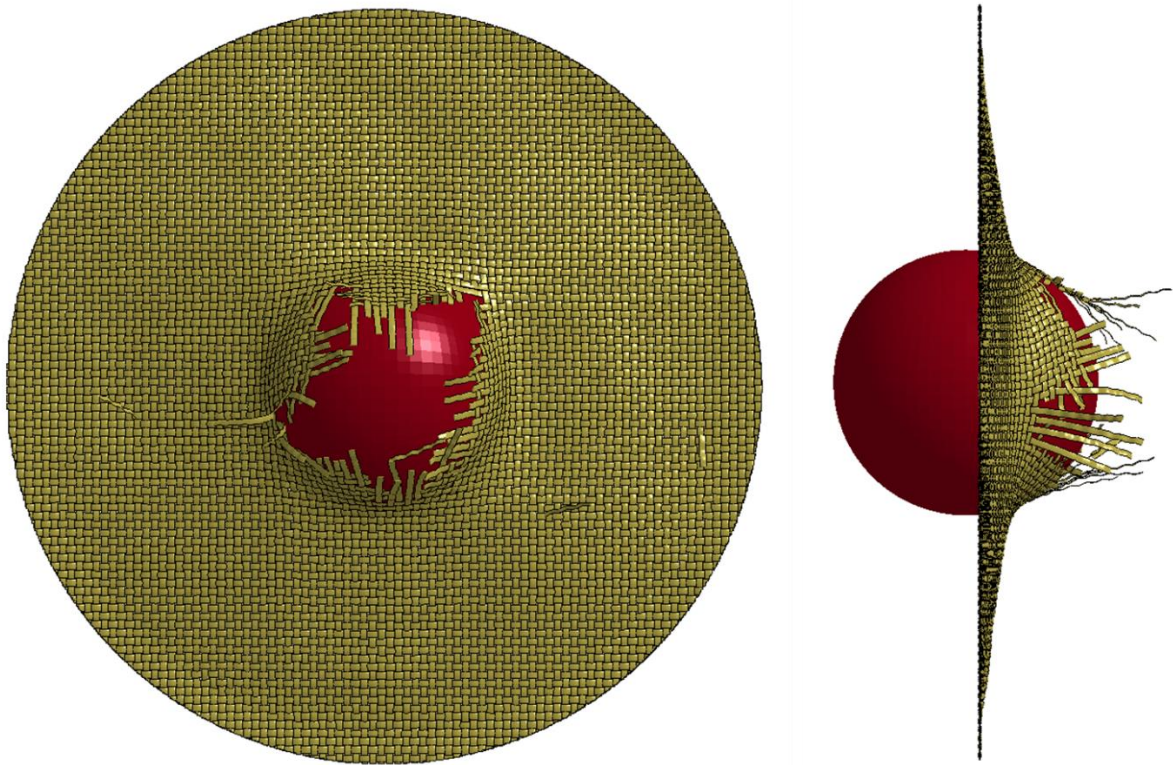
Obr. 8.3 Průběh kontaktní síly v závislosti na posuvu trnu



Obr. 8.4 První hlavní napětí při posuvu trnu $u = 7$ mm



Obr. 8.5 První hlavní napětí před a po přetržení vláken



Obr. 8.6 Protržení tkaniny

Porovnáním experimentu a výpočtového modelu lze konstatovat, že výpočtový model dokáže reflektovat porušování vláken (nití) v místě interakce tkaniny a trnu. Rovněž hodnoty síly a posuvu v momentě protržení jsou si blízké.

Doba výpočtu úlohy byla 360 hodin při využití 4 jader procesoru. Vezmeme-li v potaz, že výpočtový model je vytvořen pouze pro malý objem tkaniny a doba výpočtu je 360 hodin, je zcela zřejmé, že tato metoda je velice neefektivní. Pro praktické aplikace, kdy

je laminát tvořen desítkami vrstev, je tato metoda výpočtového modelování nevyužitelná. Z tohoto důvodu není tento způsob modelování v následujících pasážích práce dále využit.

Pozn.: Tento výpočtový model neslouží primárně k posouzení odolnosti tkaniny, která je předmětem této práce, nýbrž k posouzení k přístupu modelování metodou MESO-MODELING.

8.2 MACRO metoda - Simulace

Pro tuto metodu modelování je využito více modelů materiálu. Nejdříve jsou uvedeny a popsány jednotlivé simulace. Následně jsou uvedeny výpočtové modely pro jednotlivé modely materiálu včetně stanovení a optimalizace materiálových parametrů.

Metoda je využita pro tyto modely materiálu:

*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC (*MAT_002)

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC (*MAT_003)

*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE (*MAT_054)

*MAT_DRY_FABRIC (*MAT_214)

*MAT_MICROMECHANICS_DRY_FABRIC (*MAT_235)

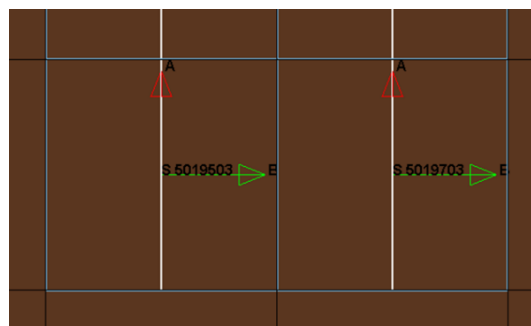
Hustota

Z měření je známá plošná hustota tkaniny (ρ_s). Budeme-li uvažovat tkaninu jako kontinuum, její hustota (ρ) je dle následujícího vztahu.

$$\rho = \frac{\rho_s}{t} = \frac{0,12}{0,00017} = 705,8 \text{ kg/m}^3$$

Elementy

Výpočtové modely jsou sestaveny pro skořepinové i objemové elementy. Velikost prvku je stanovena na hodnotu 1 mm. Hodnota je zvolena z důvodu, aby byl model dostatečně diskretizován, a zároveň aby rapidně nenarůstal počet elementů v případě větších úloh. Výpočtové modely obsahují podmínky porušení, které mohou být citlivé na změnu velikosti prvku. Z tohoto důvodu je ve všech následujících modelech ponechána stejná velikost prvku. U objemových elementů výška elementu odpovídá tloušťce tkaniny. U skořepinových prvků je předepsána odpovídající výška. Ortotropie materiálu je respektována v každém prvku samostatně. Materiálové osy jsou určeny polohou uzlů daného elementu (Obr. 8.7).



Obr. 8.7 Lokální souřadnicový systém elementů

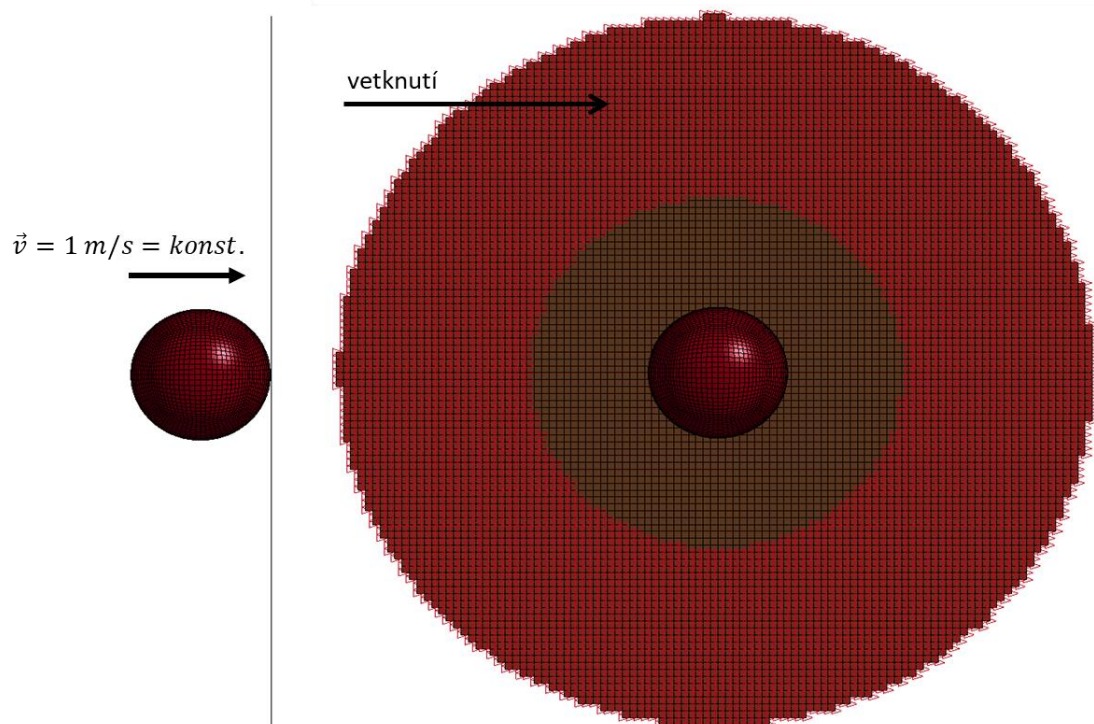
8.2.1 Simulace zkoušky protlačení trnem

MKP model

Síť je vytvořena s ohledem na rozměry zkoušky. V místě uchycení tkaniny je předepsaná okrajová podmínka vetknutí. Trnu je předepsaná konstantní rychlost během celého děje, a to 1 m/s. Tuhost trnu je několikanásobně vyšší nežli tuhost tkaniny, tudíž je trn modelován jako tuhé těleso (*MAT_RIGID).

Kontakt

V úloze je zahrnut kontakt se třením mezi tkaninou a trnem. Hodnota statického f_s a dynamického f_d součinitele tření je $f_s = f_d = 0,2$. Tyto hodnoty vychází z dostupné literatury [21, 25, 26, 36].



Obr. 8.8 Síť a okrajové podmínky

8.2.2 Simulace střelby do jedné vrstvy tkaniny

MKP model

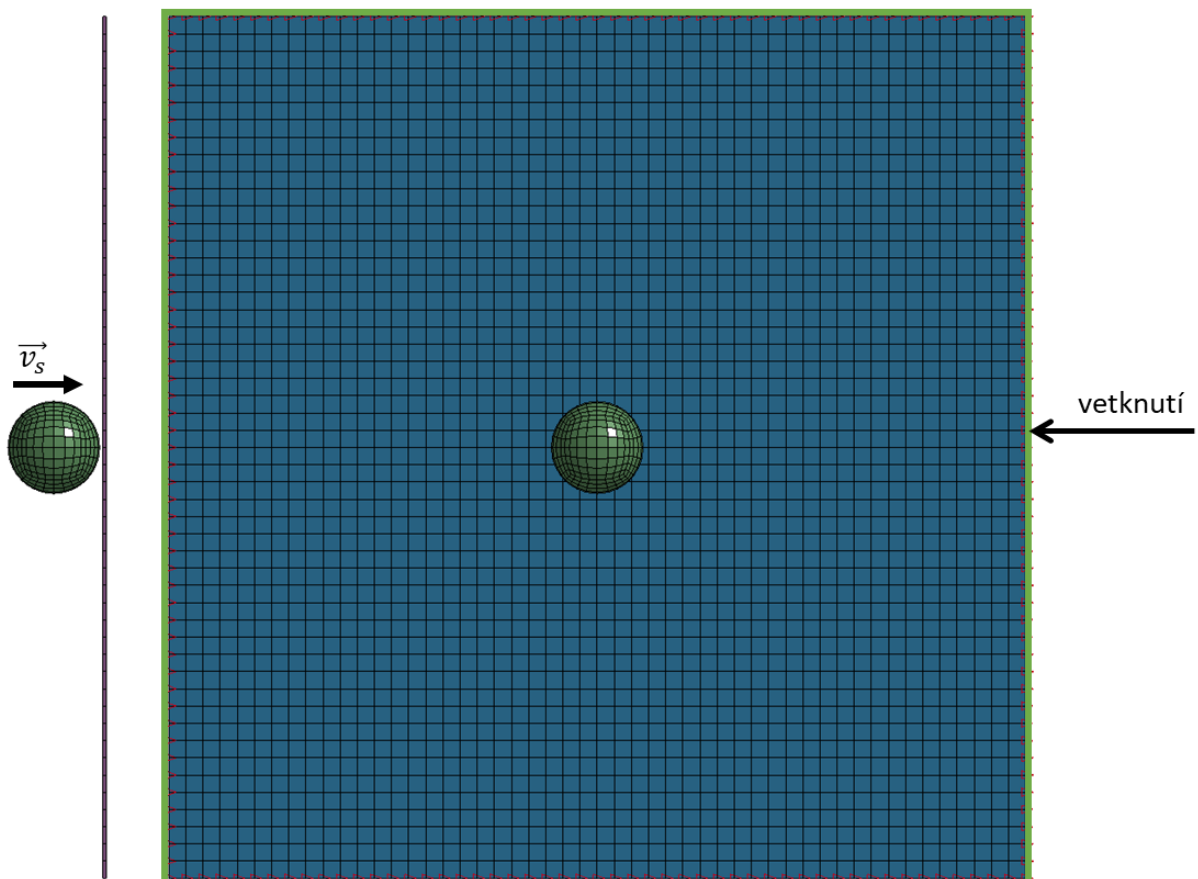
Model jedné vrstvy tkaniny má rozměry $50 \times 50 \times 0,17$ mm. V případě objemových elementů je model tvořen 5202 uzly a 2500 elementy, v případě skořepinových elementů je tvořen 2601 uzly a 2500 elementy.

Střela je modelována jako koule o průměru $\phi = 5,35$ mm a je modelována jako tuhé těleso.

Modelu tkaniny je po obvodu předepsaná okrajová podmínka vetknutí. Střele je předepsaná počáteční podmínka v podobě počáteční rychlosti v_s v rozsahu $v_s = 0 - 500$ m/s.

Kontakt

V úloze je zahrnut kontakt se třením mezi tkaninou a střelou. Hodnota statického f_s a dynamického f_d součinitele tření je $f_s = f_d = 0,2$.



Obr. 8.9 Síť a okrajové podmínky

8.2.3 Simulace střelby do deseti vrstev tkaniny

MKP model

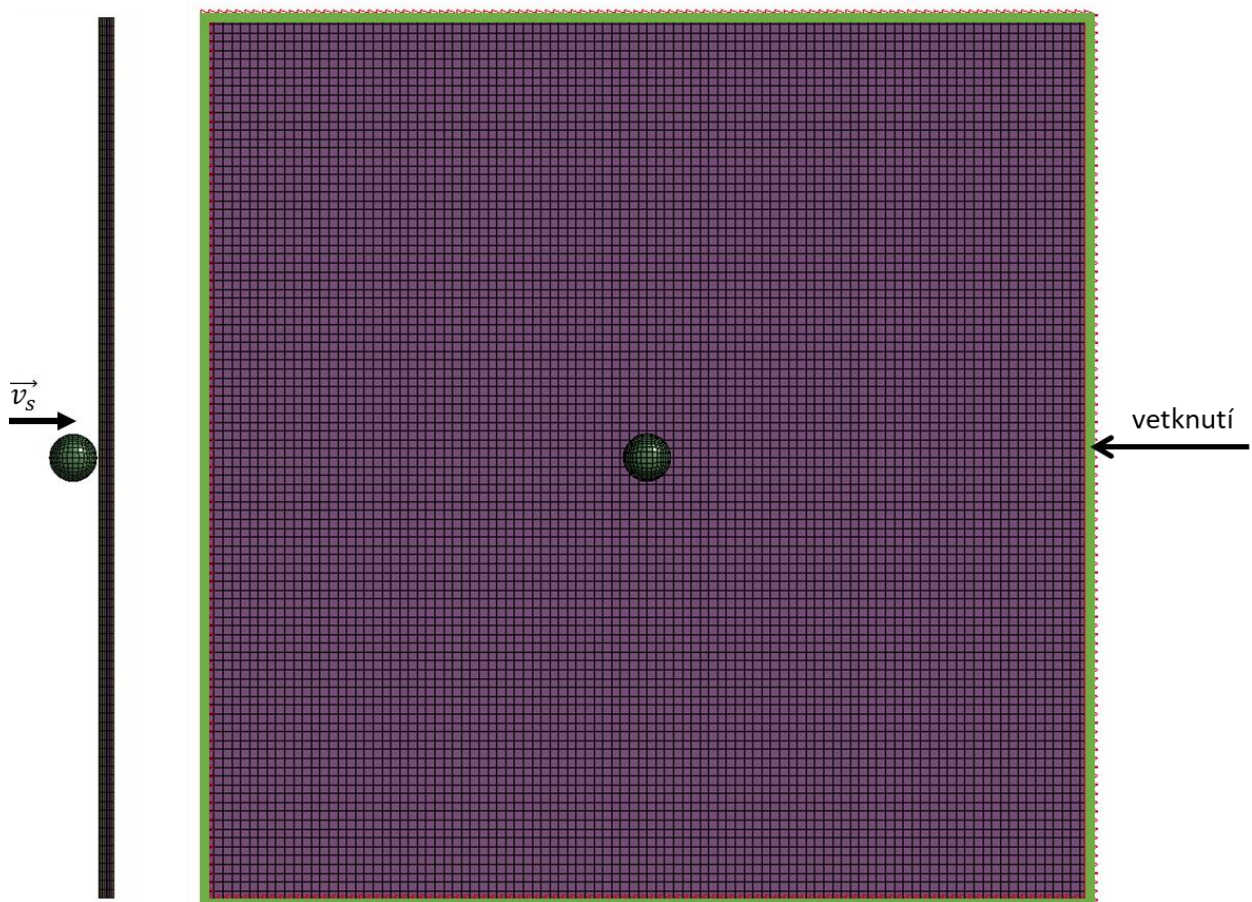
Model deseti vrstev tkaniny má rozměry $100 \times 100 \times 0,17$ mm, přičemž každá vrstva je modelována samostatně. V případě objemových elementů je model tvořen 204 020 uzly a 100 000 elementy, v případě skořepinových elementů je tvořen 102 010 uzly a 100 000 elementy. Všechny vrstvy pro ortotropní materiály jsou shodně orientovány.

Střela je modelována jako koule o průměru $\phi = 5,35$ mm a je modelována jako tuhé těleso.

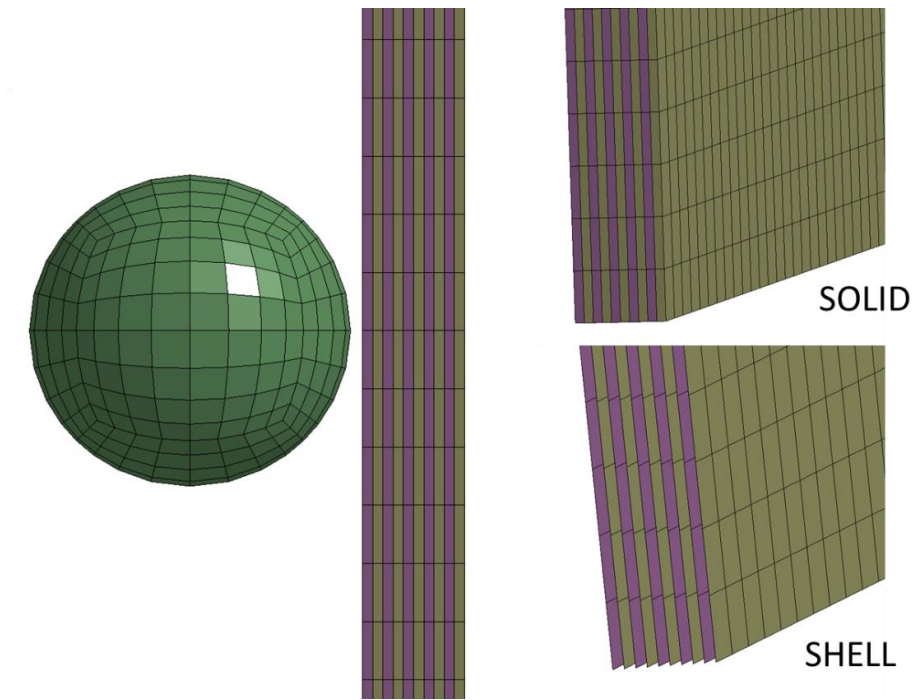
Modelu tkaniny je po obvodu předepsaná okrajová podmínka vetknutí. Střele je předepsaná počáteční podmínka v podobě počáteční rychlosti. Její hodnota je v rozsahu $0 - 1\,000$ m/s.

Kontakt

V úloze je zahrnut kontakt se třením mezi tkaninou a střelou, a mezi jednotlivými vrstvami tkaniny. Hodnota statického f_s a dynamického f_d součinitele tření je $f_s = f_d = 0,2$.



Obr. 8.10 Síť a okrajové podmínky



Obr. 8.11 Detailní pohled na síť

8.3 MACRO metoda – výpočtové modely

V této pasáži jsou popsány a zhodnoceny výpočtové modely pro jednotlivé modely materiálu. Některé modely materiálu umožňují využití objemových a skořepinových elementů. V případě těchto modelů jsou využity obě varianty.

8.3.1 *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC – Skořepinové elementy

Pro tento model jsou využity membránové elementy s plnou integrací. Na základě tahových zkoušek bylo možné stanovit parametry E_a a E_b . Stanovení parametrů G_{ij} a μ_{ij} je u tkaniny velice komplikované. Rovněž experimentální zkoušky pro stanovení těchto veličin jsou velice problematické, ne-li nerealizovatelné. Hodnoty těchto veličin jsou stanoveny na základě dostupné literatury [40]. Do modelu je dále implementována podmínka porušení, a to sice maximálního prvního napětí σ_1 . Parametry G_{ij} a μ_{ij} jsou optimalizované na základě simulace protlačovací zkoušky. U modelu tkaniny je uvažováno tlumení, a to ve formě Rayleighova koeficientu tlumení o hodnotě 0,05.

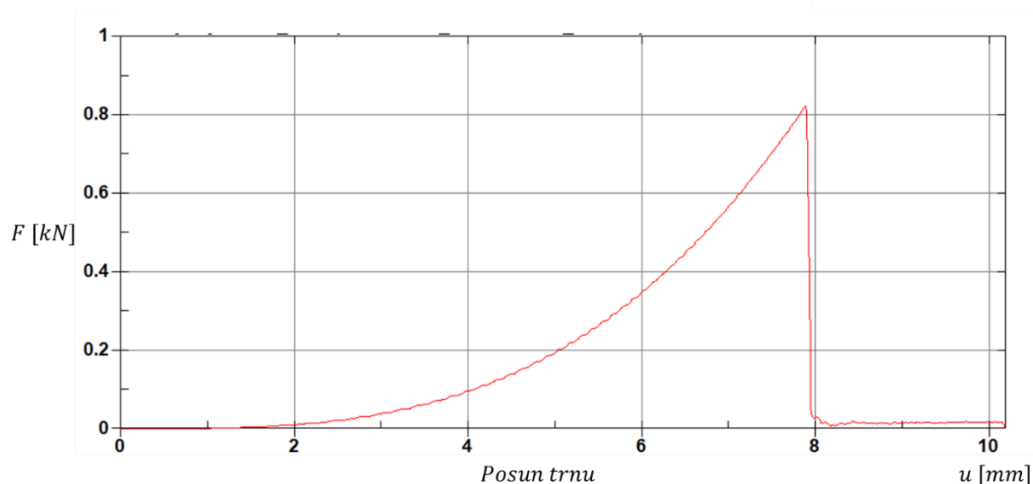
Aramidová tkanina vykazuje rozdílnou pevnost ve směru úteku a osnovy, avšak podmínka porušení umožňuje zadat pouze jednu hodnotu porušení. Z tohoto důvodu je tato hodnota optimalizována tak, aby simulace protlačovací zkoušky odpovídala co nejvíce experimentu. Optimalizované materiálové parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 8.2 Materiálové parametry

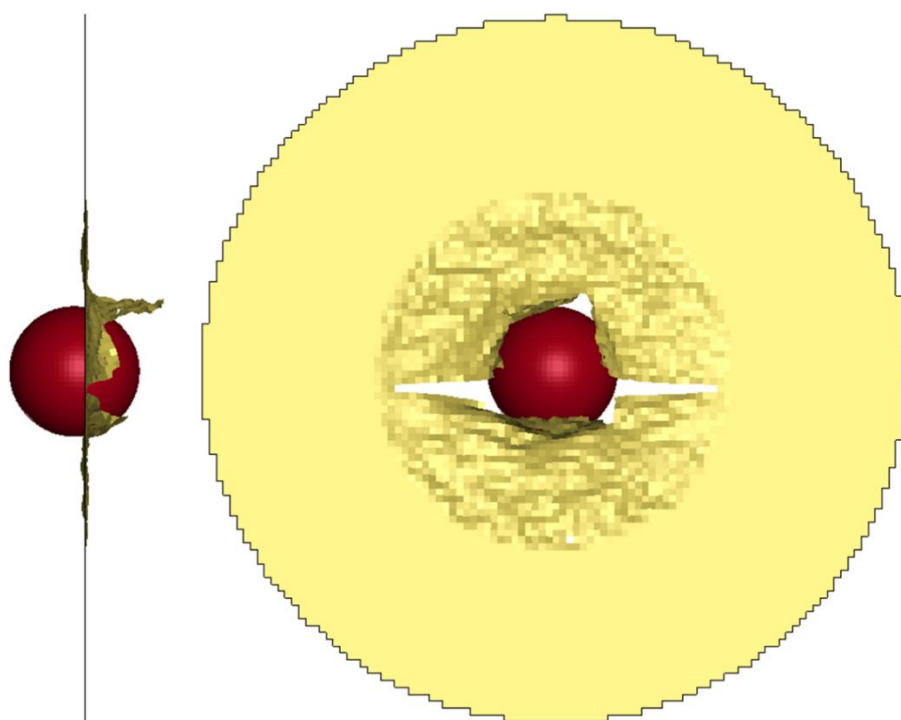
E_a [GPa]	E_b [GPa]	E_c [GPa]	G_{ab}, G_{bc}, G_{ac} [GPa]	$\mu_{ab}, \mu_{bc}, \mu_{ac}$ [-]	σ_1 [MPa]
7,4	3,9	4,0	0,4	0,1	530

Simulace zkoušky protlačení trnem

Na Obr. 8.13 je znázorněn průběh kontaktní síly mezi modelem tkaniny a trnu. Materiálové parametry jsou optimalizované tak, že k protržení dojde při síle $F = 824 N$ a posuvu $u = 7,9 mm$. K porušení dojde především ve směru vyšší tuhosti materiálu.



Obr. 8.12 Závislost síly na posuvu trnu



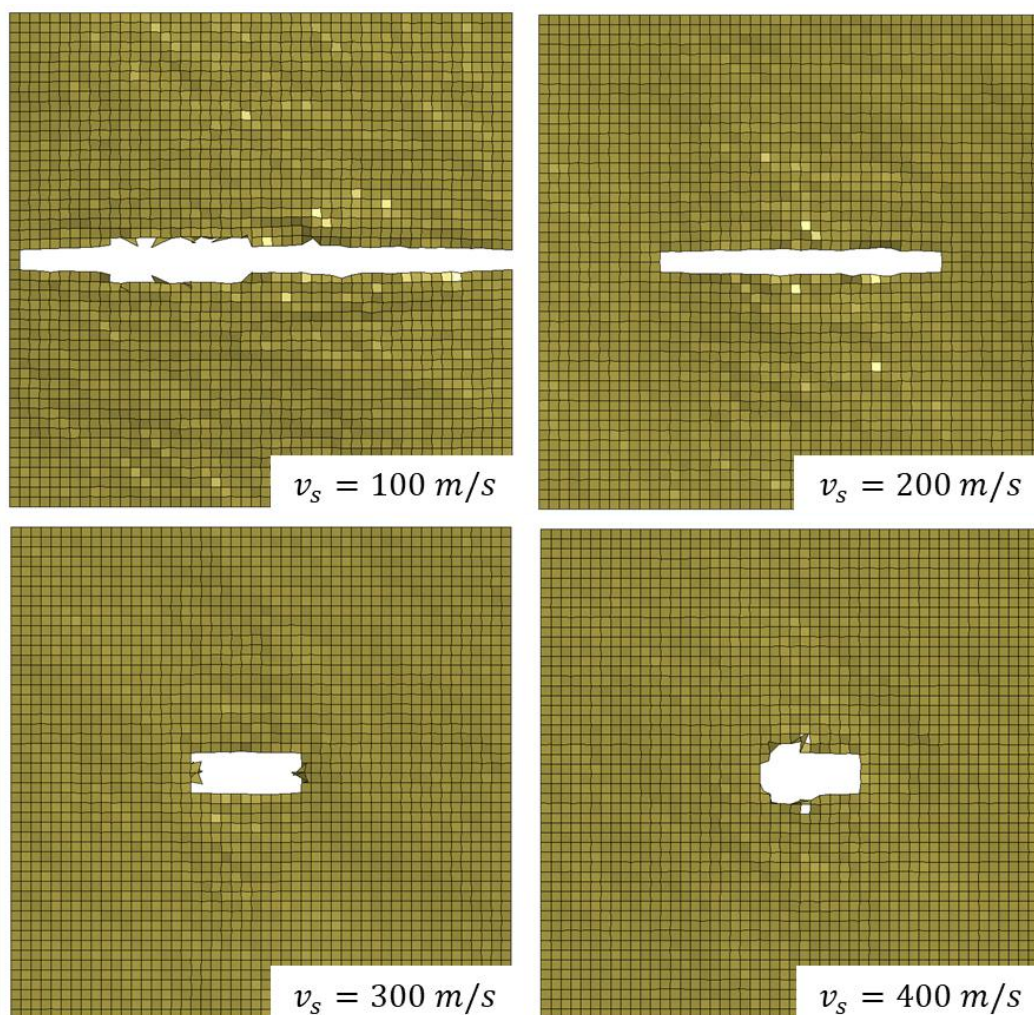
Obr. 8.13 Model tkaniny po protržení

Simulace střelby do jedné vrstvy tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 50 - 500 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.3. Na Obr. 8.14 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro jednotlivé rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Tabulka 8.3 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	50	100	200	300	400	500
v_r [m/s]	0	72	197	298	398	498



Obr. 8.14 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny

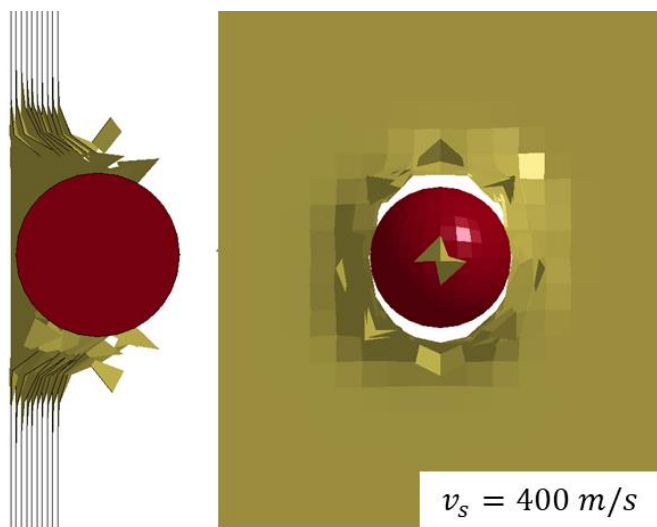
Z Obr. 8.14 je zřejmé, že po průstřelu dojde porušení převážně v jednom směru a následnému roztržení modelu v tomto směru (pro rychlost 100 m/s a 200 m/s). V případě průstřelu by mělo dojít pouze k vytvoření otvoru o průměru blízkém průměru střely. Snahou během vývoje bylo optimalizovat materiálové parametry a využít jiné podmínky porušení tak, aby nedocházelo k nestabilnímu chování modelu. Tohoto cíle se nepodařilo dosáhnout. Jednou z příčin může být vliv okrajové podmínky (vetknutí).

Simulace střelby do deseti vrstev tkaniny

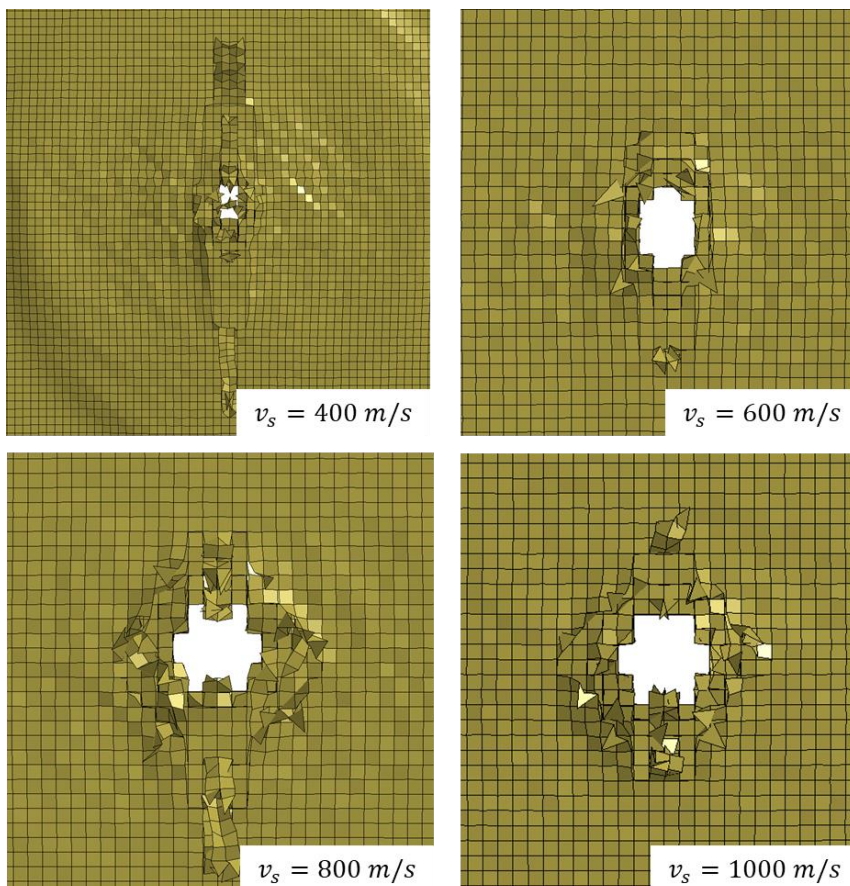
Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 200 - 1000 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.4. Na Obr. 8.16 je zobrazena tkanina po průstřelu pro jednotlivé rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Tabulka 8.4 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

$v_s \text{ [m/s]}$	200	400	600	800	1000
$v_r \text{ [m/s]}$	0	370	570	762	957



Obr. 8.15 Simulace střelby, $v_s = 400 \text{ m/s}$



Obr. 8.16 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny

8.3.2 *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC – Objemové elementy

Pro tento model jsou využity objemové prvky s redukovanou integrací. Jelikož prvky mají špatný poměr stran (délka/výška), byla vyzkoušena formulace elementu, která má eliminovat negativní účinky způsobené tímto špatným poměrem. Nicméně tato formulace nemá zásadní vliv na chování model a rovněž je časově neefektivní. Z tohoto důvodu je ponechána základní formulace elementu. Ke stejnému závěru se dospělo i u dalších výpočtových modelů.

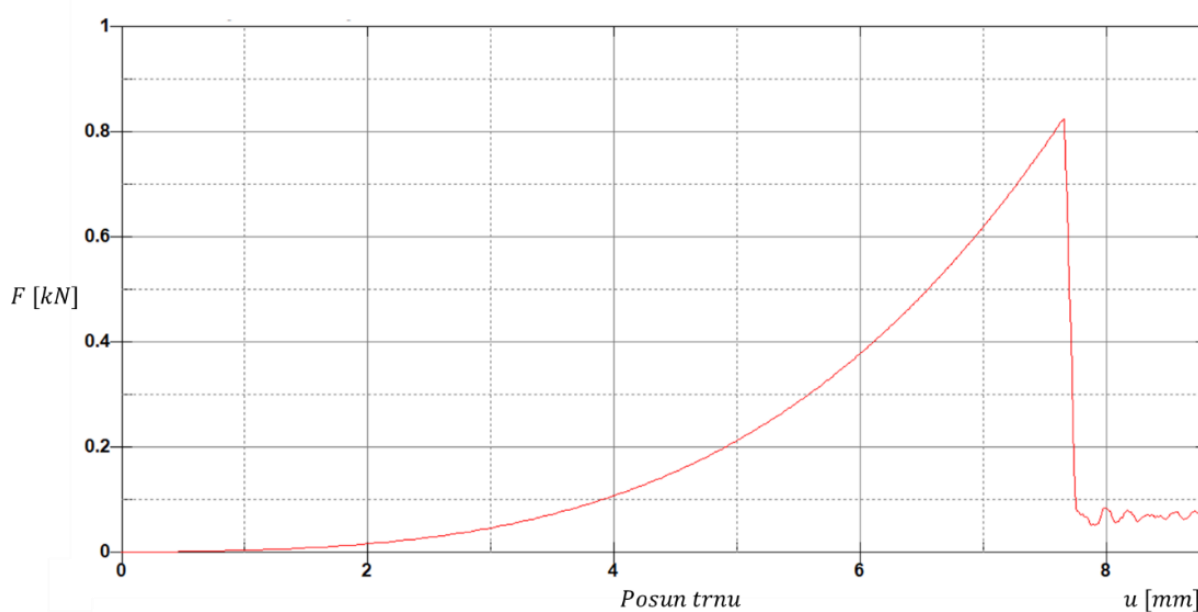
Při stanovení materiálových parametrů se vycházelo z předchozího modelu (Kap. 8.3.1), které byly následně optimalizované (Tabulka 8.5). U modelu tkaniny je uvažováno tlumení, a to ve formě Rayleighova koeficientu tlumení o hodnotě 0,05.

Tabulka 8.5 Materiálové parametry

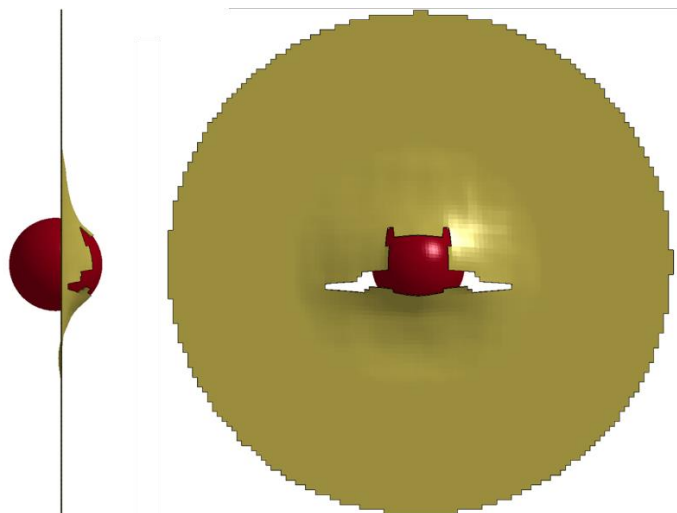
E_a [GPa]	E_b [GPa]	E_c [GPa]	G_{ab}, G_{bc}, G_{ac} [GPa]	$\mu_{ab}, \mu_{bc}, \mu_{ac}$ [-]	σ_1 [MPa]
7,4	3,9	4,0	0,4	0,1	450

Simulace zkoušky protlačení trnem

Na Obr. 8.17 je znázorněn průběh kontaktní síly mezi modelem tkaniny a trnu. Materiálové parametry jsou optimalizované tak, že k protržení dojde při síle $F = 830 \text{ N}$ a posuvu $u = 7,7 \text{ mm}$. K porušení dojde především ve směru vyšší tuhosti materiálu.



Obr. 8.17 Závislost síly na posuvu trnu



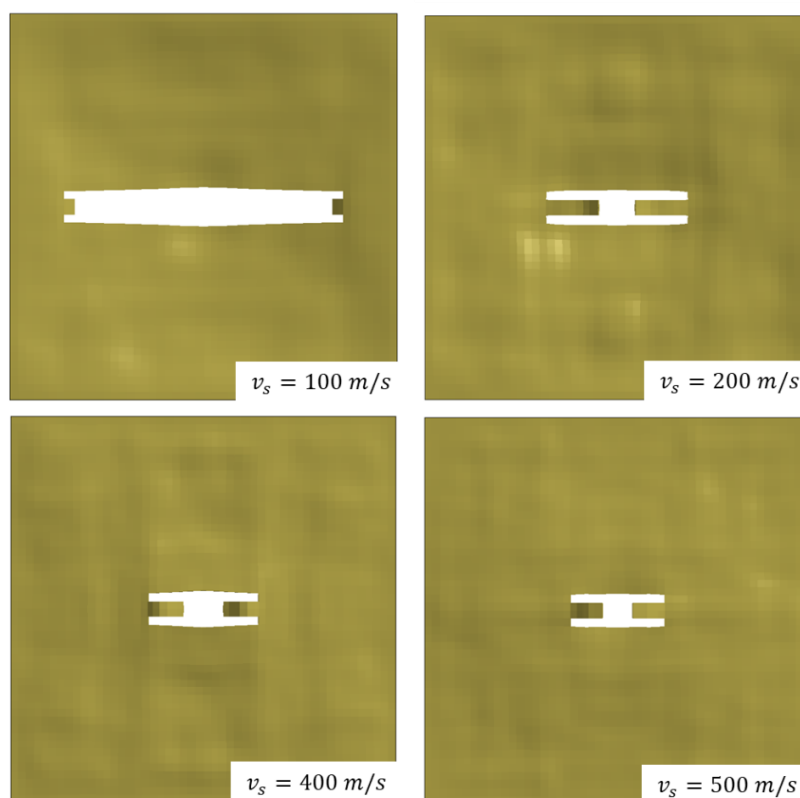
Obr. 8.18 Model tkaniny po protržení

Simulace střelby do jedné vrstvy tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 50 - 500 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.6. Na Obr. 8.19 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro jednotlivé rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Tabulka 8.6 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	50	100	200	300	400	500
v_r [m/s]	0	75	191	293	395	496



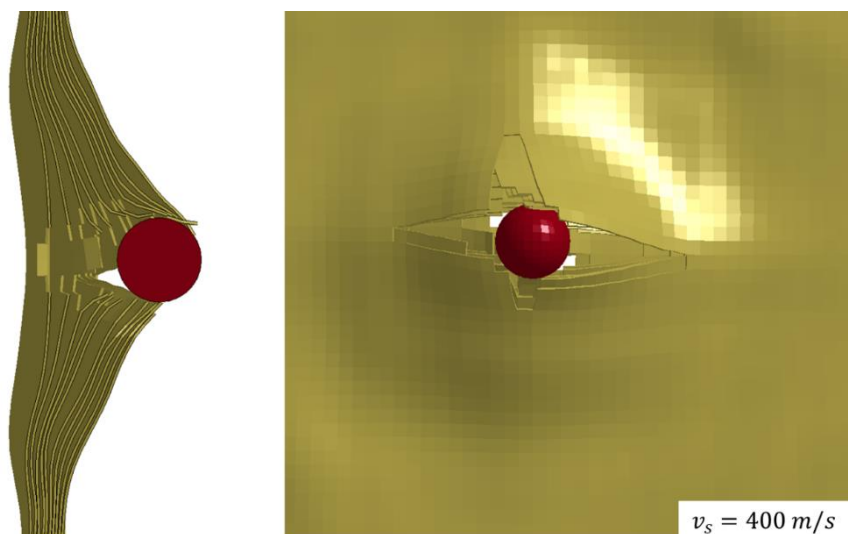
Obr. 8.19 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny

Simulace střelby do deseti vrstev tkaniny

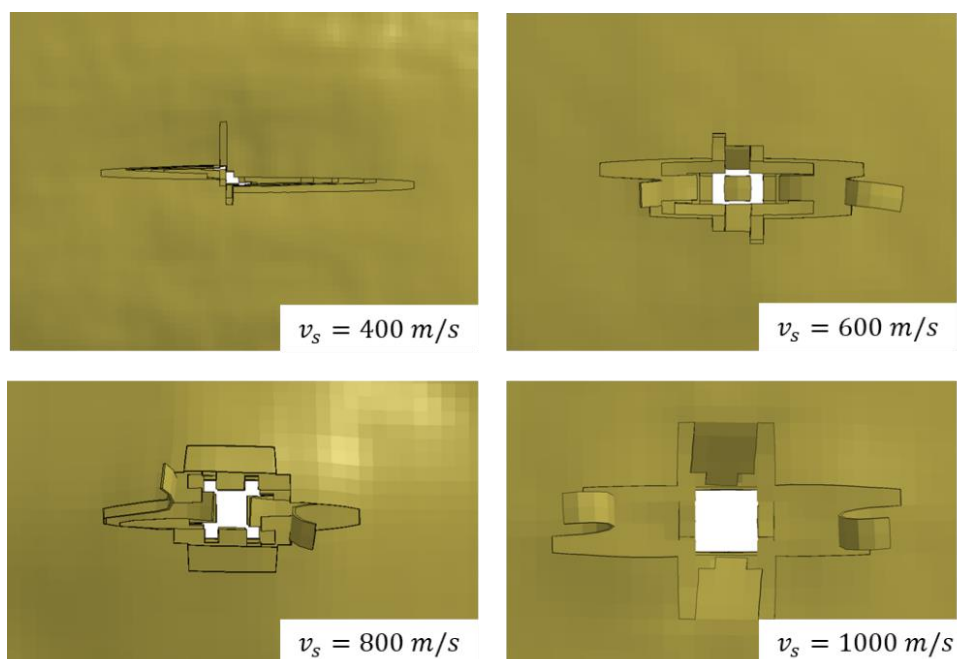
Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 200 - 1000 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.7. Na Obr. 8.21 je zobrazena tkanina po průstřelu pro jednotlivé rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Tabulka 8.7 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	200	400	600	800	1000
v_r [m/s]	0	326	549	748	949



Obr. 8.20 Simulace střelby, $v_s = 400 \text{ m/s}$



Obr. 8.21 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny

Z Obr. 8.19 a Obr. 8.21 je zřejmé, že po průstřelu dojde k porušení tkaniny převážně v jednom směru a následnému roztržení modelu v tomto směru, což svědčí o nestabilitě modelu. Obdobě, jako u předchozího modelu, bylo snahou optimalizovat materiálové parametry za cílem eliminace nežádoucích efektů. Tento nežádoucí efekt se nepodařilo odstranit.

8.3.3 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC – Skořepinové elementy

Jedná se o izotropní model, který tedy není schopen respektovat směrovou strukturu tkaniny. Byť tento model pro modelování tkaniny není zcela fyzikálně korektní, jeho využití má své opodstatnění. Pro stanovení balistické odolnosti je klíčové stanovení hodnoty kritické rychlosti v_{50} , v_{bl} a deformace terče. Tyto hodnoty lze stanovit i na základě izotropního modelu. Rovněž budeme-li modelovat tvarově složitý objekt, pak je třeba použít nepravidelné elementy. U těchto elementů může být velmi komplikované stanovit směr vláken, aby byla respektovaná orthotropie materiálu. Dále pokud budeme modelovat objekt který je tvořen několika vrstvami, nemusí být vždy zcela znám směr vláken v jednotlivých vrstvách.

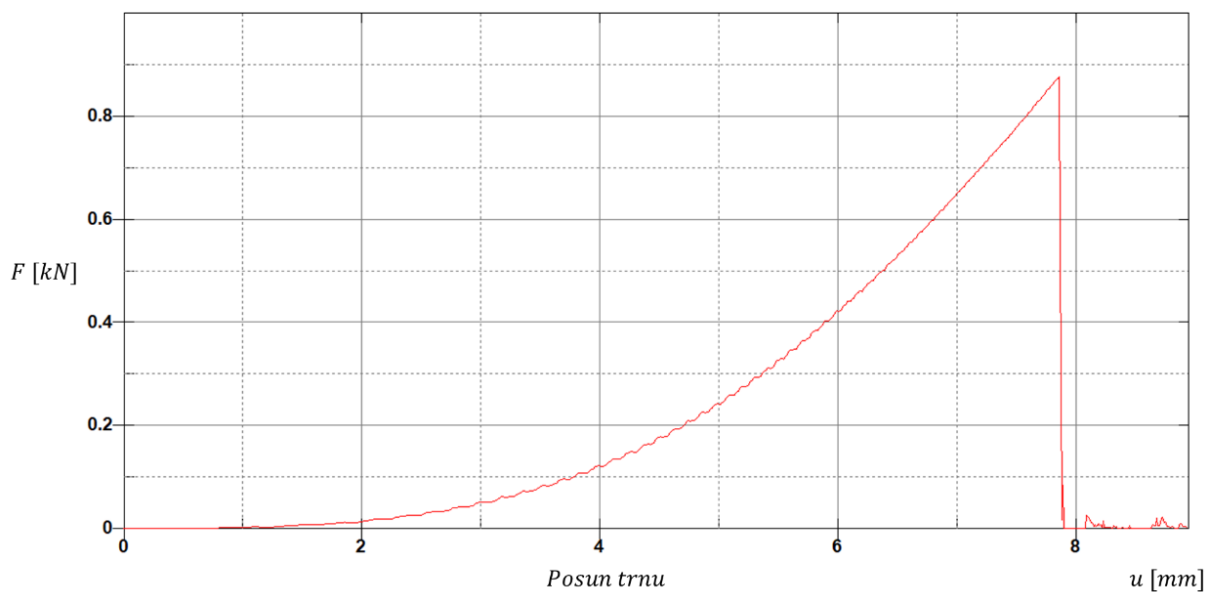
Pro model tkaniny jsou využity skořepinové elementy s plnou integrací a třemi integračními body po tloušťce. Při stanovení materiálových parametrů se vycházelo z tahových zkoušek. Dále je dodána podmínka porušení maximálního prvního napětí σ_1 . Tyto hodnoty jsou optimalizovány na základě simulace protlačení a střeleckých zkoušek. U modelu tkaniny je uvažováno tlumení, a to ve formě Rayleighova koeficientu tlumení o hodnotě 0,05.

Tabulka 8.8 Materiálové parametry

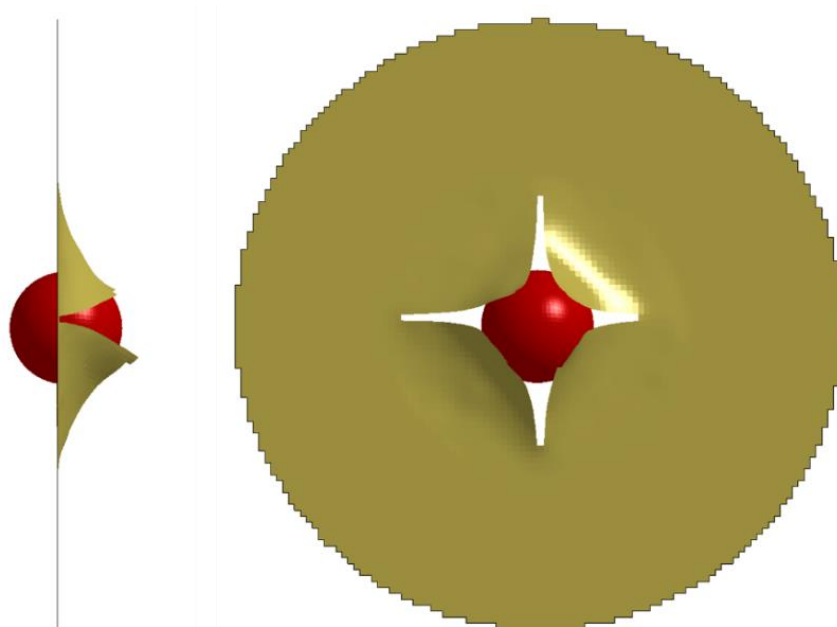
E [GPa]	μ	R_e [MPa]	E_t [GPa]	σ_1 [MPa]
5,52	0,20	253	1,4	400

Simulace zkoušky protlačení trnem

Materiálové parametry jsou optimalizované tak, že k protržení dojde při síle $F = 856 N$ a posuvu $u = 7,8 mm$.



Obr. 8.22 Závislost síly na posuvu trnu



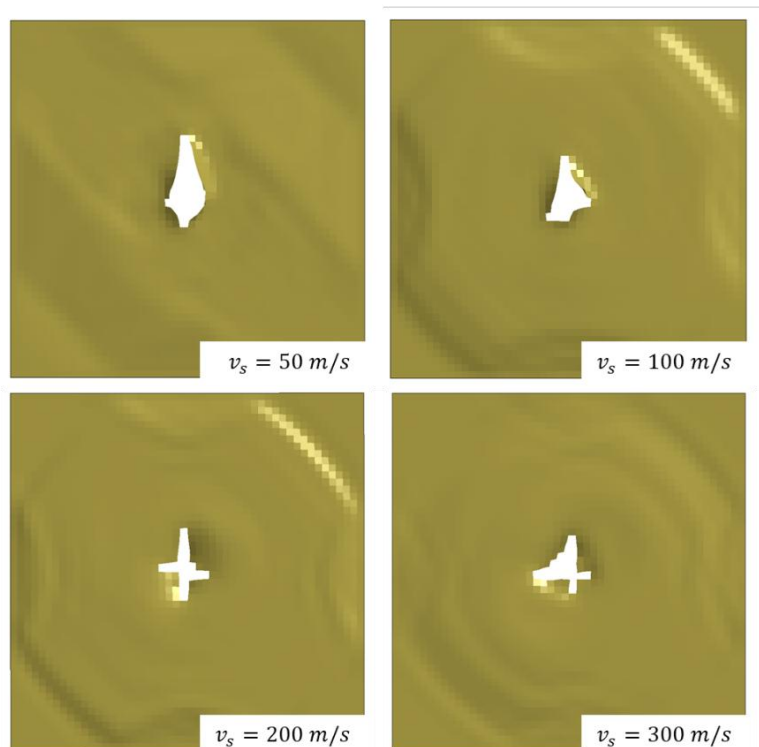
Obr. 8.23 Model tkaniny po protržení

Simulace střelby do jedné vrstvy tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 30 - 500 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.9. Na Obr. 8.24 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny. Pro jednu vrstvu tkaniny nedochází po průstřelu k nestabilnímu porušování modelu.

Tabulka 8.9 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	30	50	100	200	300	400	500
v_r [m/s]	0	18	89	196	298	398	498



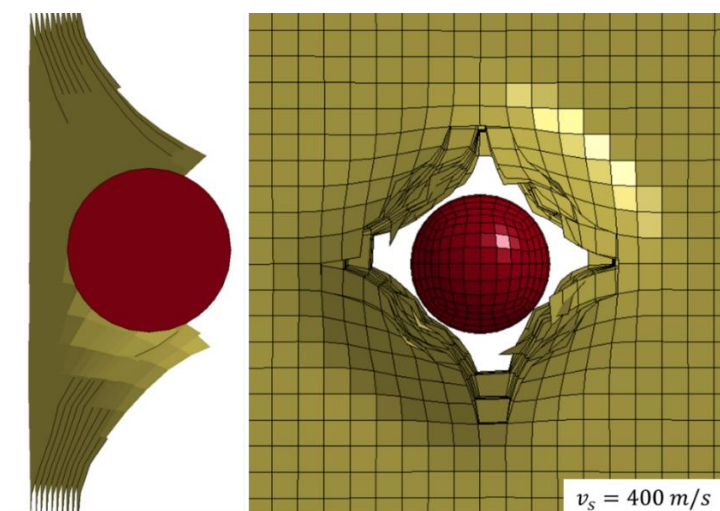
Obr. 8.24 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny

Simulace střelby do deseti vrstev tkaniny

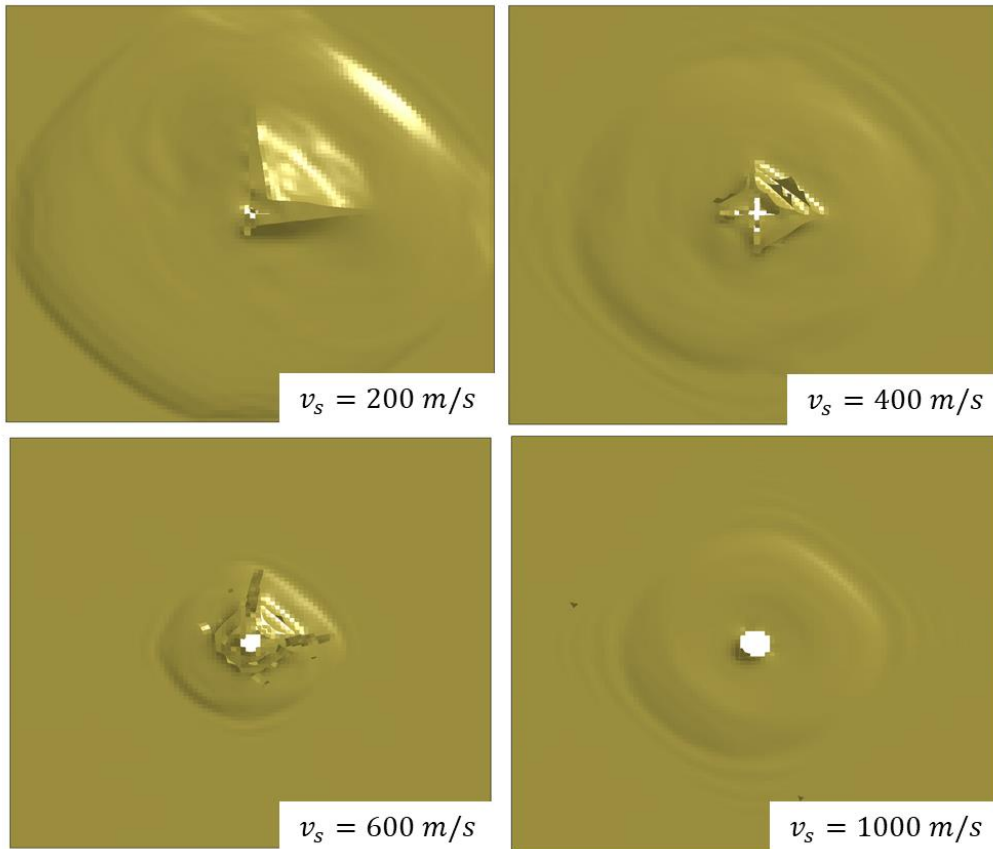
Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 200 - 1000 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.10. Na Obr. 8.26 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Tabulka 8.10 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	100	150	200	400	600	800	1000
v_r [m/s]	0	0	126	368	568	762	952



Obr. 8.25 Simulace střelby, $v_s = 400 \text{ m/s}$



Obr. 8.26 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny

V případě deseti vrstev se model chová lehce nestabilně pro nižší rychlost, kdy dochází k trhání zadní vrstvy. Nicméně toto porušení není nijak razantní.

8.3.4 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC – Objemové elementy

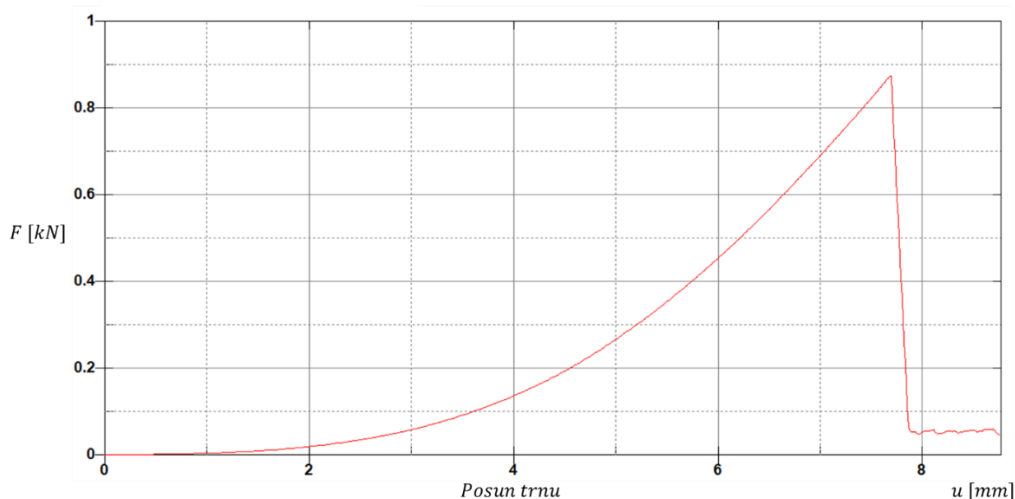
Pro tento model platí již zmíněné v kap. 8.3.3. V modelu jsou použity objemové prvky s redukovanou integrací. Materiálové parametry byly optimalizované na základě simulace protlačovací zkoušky a střeleckých zkoušek. Dále je dodána podmínka porušení. Na základě optimalizačního procesu se jevila jako nejstabilnější podmínka porušení v podobě maximálního objemového přetvoření ϵ_{vol} (viz. Kap. 6.2). Tato hodnota je rovněž optimalizována. U modelu tkaniny je uvažováno tlumení, a to ve formě Rayleighova koeficientu tlumení o hodnotě 0,05.

Tabulka 8.11 Materiálové parametry

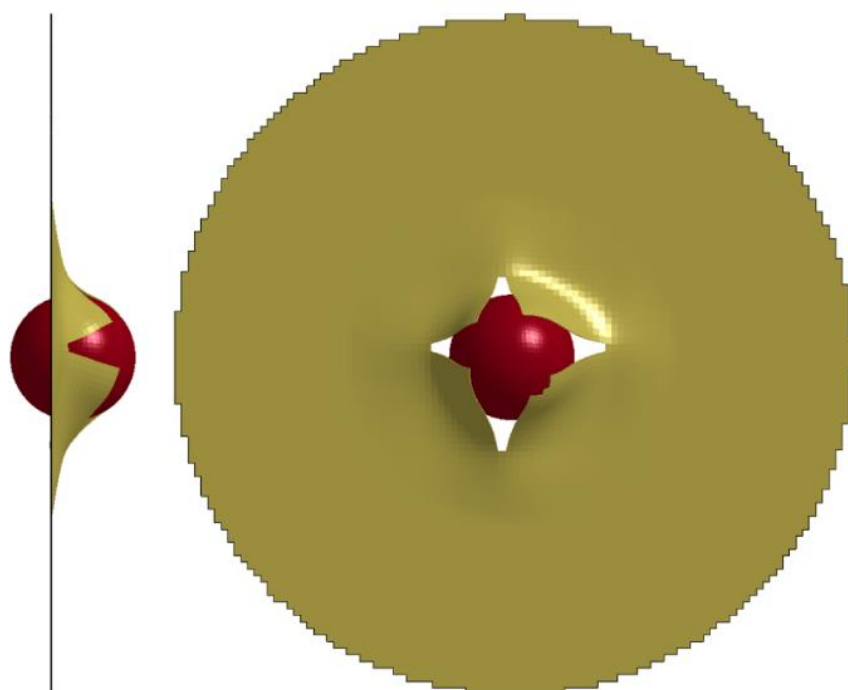
E [GPa]	μ	R_e [MPa]	E_t [GPa]	ϵ_{vol} [-]
5,50	0,20	250	1,4	0,078

Simulace zkoušky protlačení trnem

Materiálové parametry jsou optimalizované tak, že k protržení dojde při síle $F = 847\text{ N}$ a posuvu $u = 7,6\text{ mm}$.



Obr. 8.27 Závislost síly na posuvu trnu



Obr. 8.28 Model tkaniny po protržení

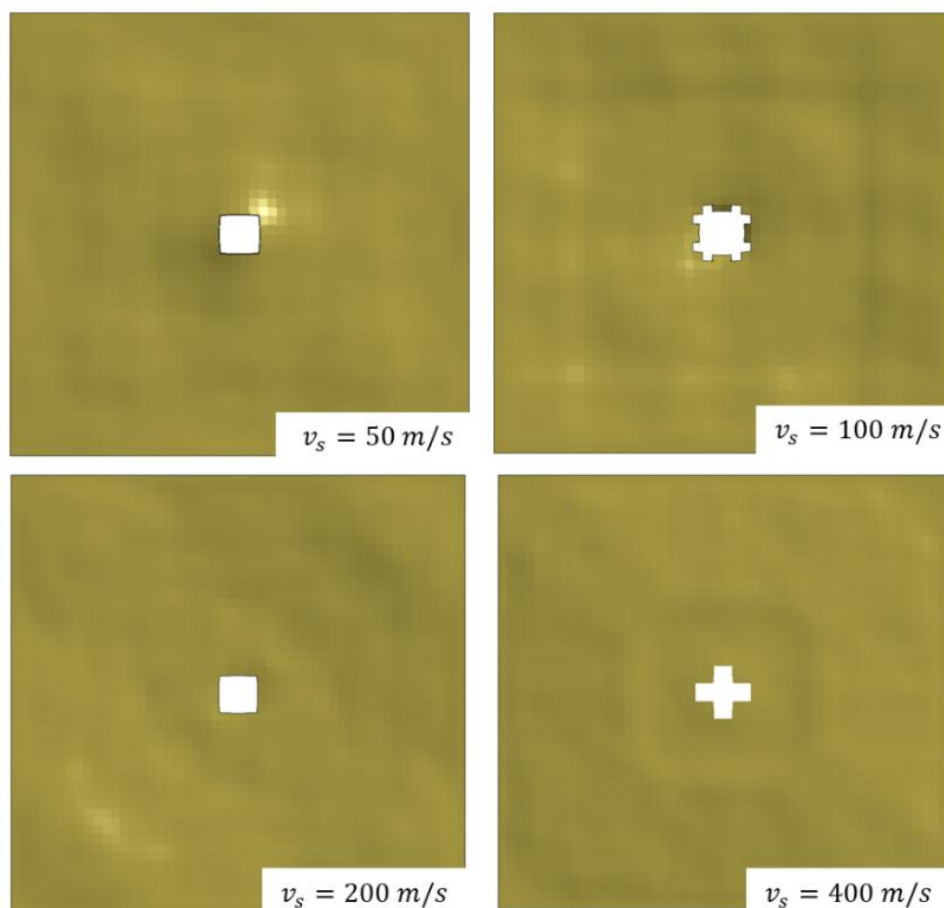
Simulace střelby do jedné vrstvy tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 50 - 500 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.12. Na Obr. 8.29 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Pro jednu vrstvu tkaniny nedochází po průstřelu k nestabilnímu porušování modelu.

Tabulka 8.12 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	50	100	200	300	400	500
v_r [m/s]	0	61	185	291	393	494



Obr. 8.29 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny

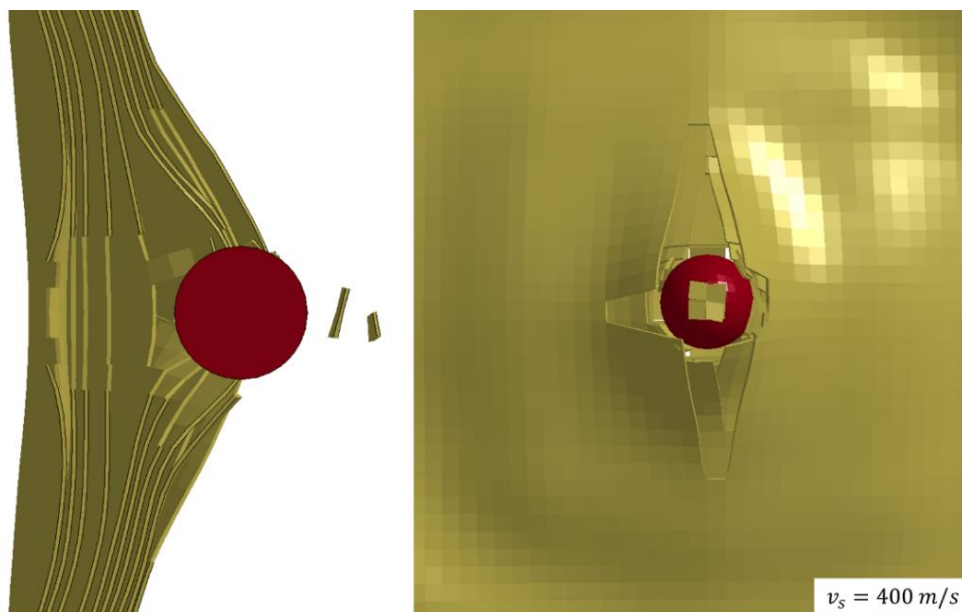
Simulace střelby do deseti vrstev tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 200 - 1000 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.13. Na Obr. 8.31 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

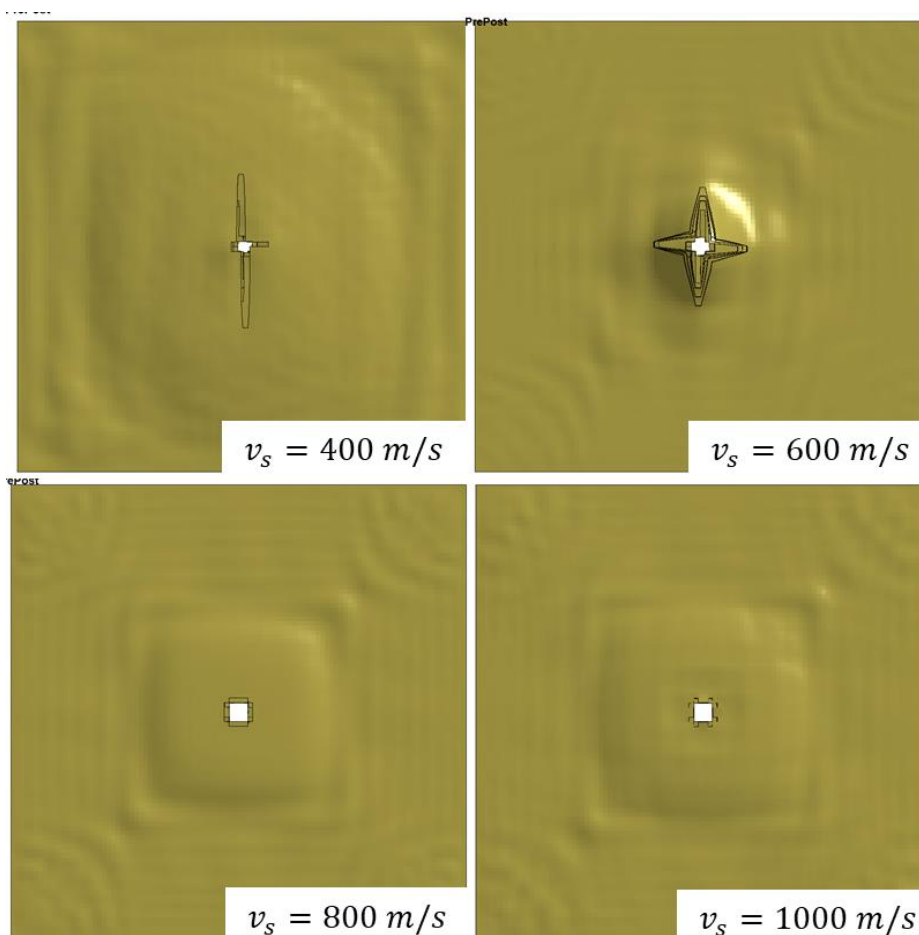
V případě deseti vrstev se model chová lehce nestabilně pro nižší rychlosti, kdy dochází k trhání zadní vrstvy. Nicméně toto porušení není nijak razantní.

Tabulka 8.13 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

$v_s \text{ [m/s]}$	200	250	300	400	600	800	1000
$v_r \text{ [m/s]}$	0	0	135	295	534	740	941



Obr. 8.30 Simulace střelby, $v_s = 400 \text{ m/s}$



Obr. 8.31 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny

8.3.5 *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE – Skořepinové elementy

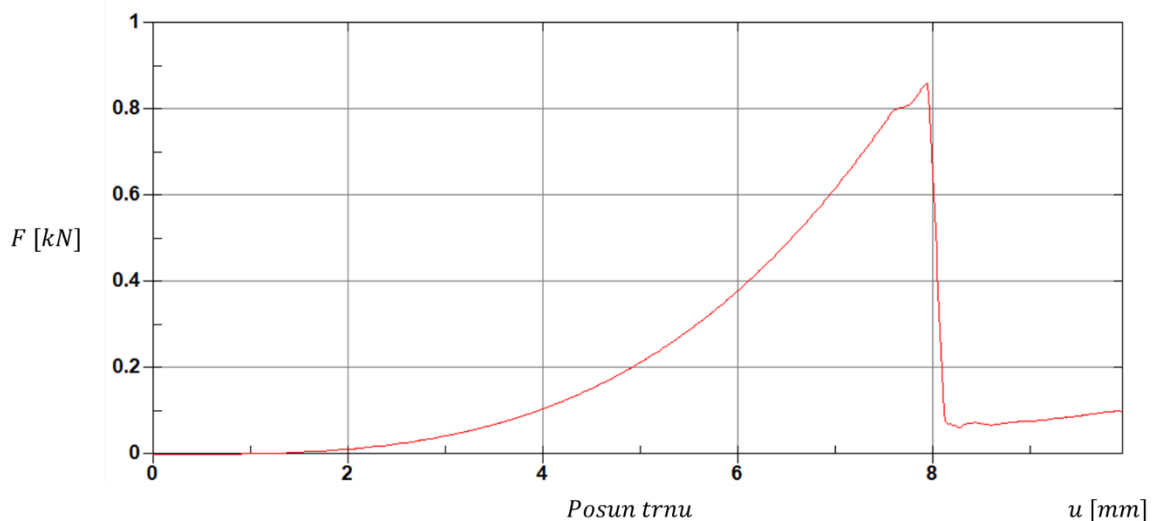
Tkanina je modelována skořepinovými elementy s plnou integrací a třemi integračními body přes tloušťku. Na základě tahových zkoušek je možné stanovit parametry E_a a E_b . U tohoto modelu je využito modelu poškození a porušení Chang-Chang (Kap. 6.1.3). Pevnosti v tahu X_t (útek) a Y_t (osnova) jsou stanoveny rovněž z tahových zkoušek. Parametry G_{ij} a μ_{ij} se stanovily na základě Kap. 8.3.1. Faktory poškození $SLIMT_i$ a $SLIMC_i$ jsou optimalizovány na základě simulace protlačovací zkoušky a střeleb. K vymazání elementu (porušení) dojde po překročení kritické hodnoty přetvoření $\epsilon_{i,max}$ či efektivnímu přetvoření ϵ_{eff} . U modelu tkaniny je uvažováno tlumení, a to ve formě Rayleighova koeficientu tlumení o hodnotě 0,05. Optimalizované materiálové parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 8.14 Materiálové parametry

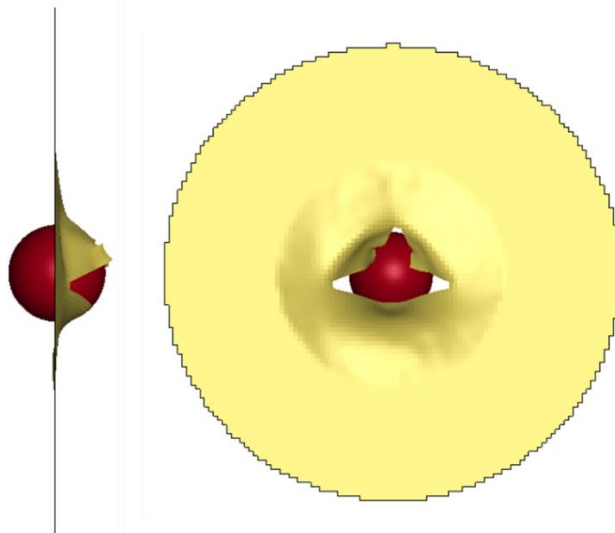
E_a [GPa]	E_b [GPa]	E_c [GPa]	G_{ab}, G_{bc}, G_{ac} [GPa]	$\mu_{ab}, \mu_{bc}, \mu_{ac}$ [-]
7,5	3,9	4,0	0,6	0,1
X_t, X_c [MPa]	Y_t, Y_c [MPa]	$SLIMT_i$	$SLIMC_i$	$\epsilon_{i,max}$
510	400	0,7	0,5	0,3

Simulace zkoušky protlačení trnem

Materiálové parametry jsou optimalizované tak, že k protržení dojde při síle $F = 861 N$ a posuvu $u = 7,9 mm$.



Obr. 8.32 Závislost síly na posuvu trnu



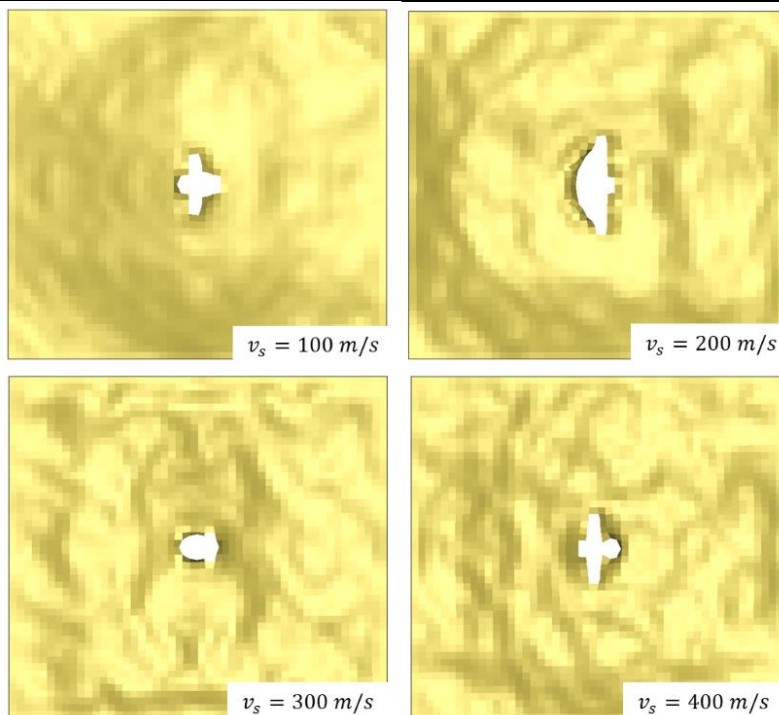
Obr. 8.33 Model tkaniny po průtržení

Simulace střelby do jedné vrstvy tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 50 - 500 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.15. Na Obr. 8.34 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny. Pro jednu vrstvu tkaniny nedochází po průstřelu k nestabilnímu porušování modelu.

Tabulka 8.15 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	50	75	100	200	300	400	500
v_r [m/s]	0	25	63	182	291	392	494



Obr. 8.34 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny

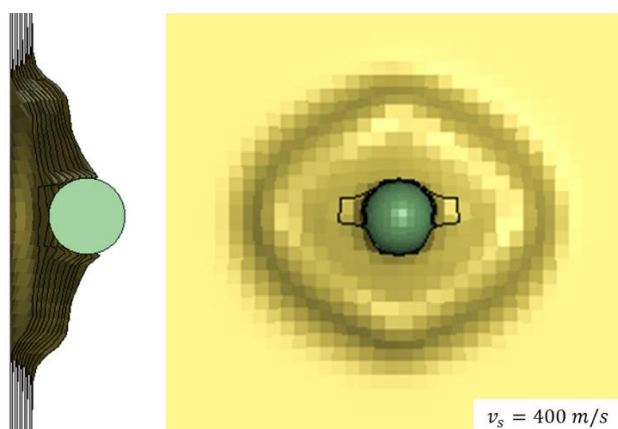
Simulace střelby do deseti vrstev tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 200 - 1000 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Na Obr. 8.36 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

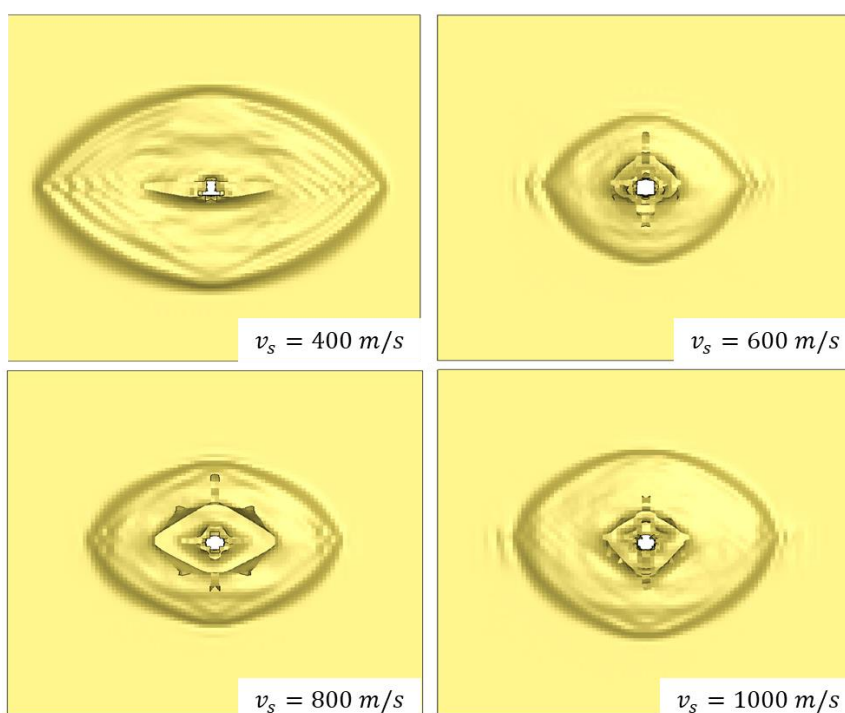
V případě deseti vrstev dochází k lehce nestabilnímu porušování zadních vrstev. Nicméně toto porušení není nijak razantní.

Tabulka 8.16 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	200	250	300	400	600	800	1000
v_r [m/s]	0	0	106	308	546	744	942



Obr. 8.35 Simulace střelby, $v_s = 400 \text{ m/s}$



Obr. 8.36 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny

8.3.6 *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE – Objemové elementy

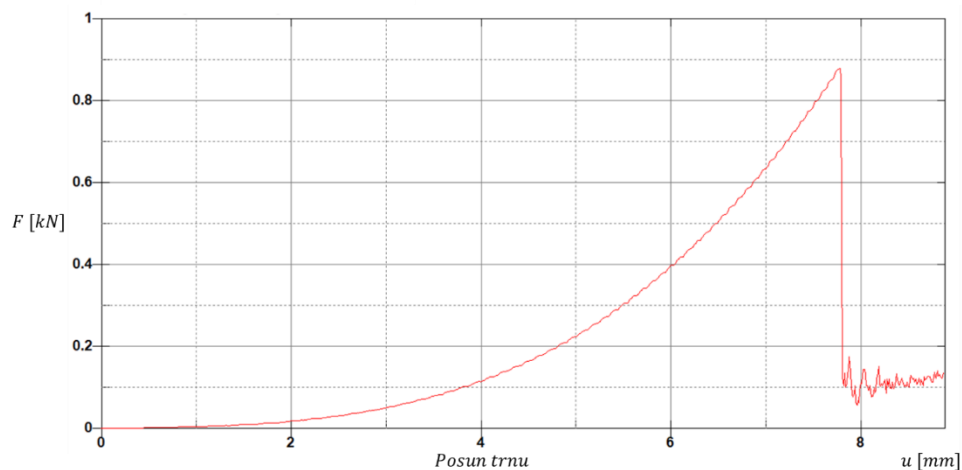
Pro tento model jsou využity objemové elementy s redukovanou integrací. Materiálové parametry byly stanoveny dle Kap. 8.3.5 a následně optimalizovány (Tabulka 8.17).

Tabulka 8.17 Materiálové parametry

E_a [GPa]	E_b [GPa]	E_c [GPa]	G_{ab}, G_{bc}, G_{ac} [GPa]	$\mu_{ab}, \mu_{bc}, \mu_{ac}$ [-]
7,5	3,9	4,0	0,5	0,1
X_t, X_c [MPa]	Y_t, Y_c [MPa]	$SLIMT_i$	$SLIMC_i$	$\epsilon_{i,max}$
440	290	0,7	0,5	0,4

Simulace zkoušky protlačení trnem

Materiálové parametry jsou optimalizované tak, že k protržení dojde při síle $F = 857\text{ N}$ a posuvu $u = 7,7\text{ mm}$.



Obr. 8.37 Závislost síly na posuvu trnu



Obr. 8.38 Model tkaniny po protržení

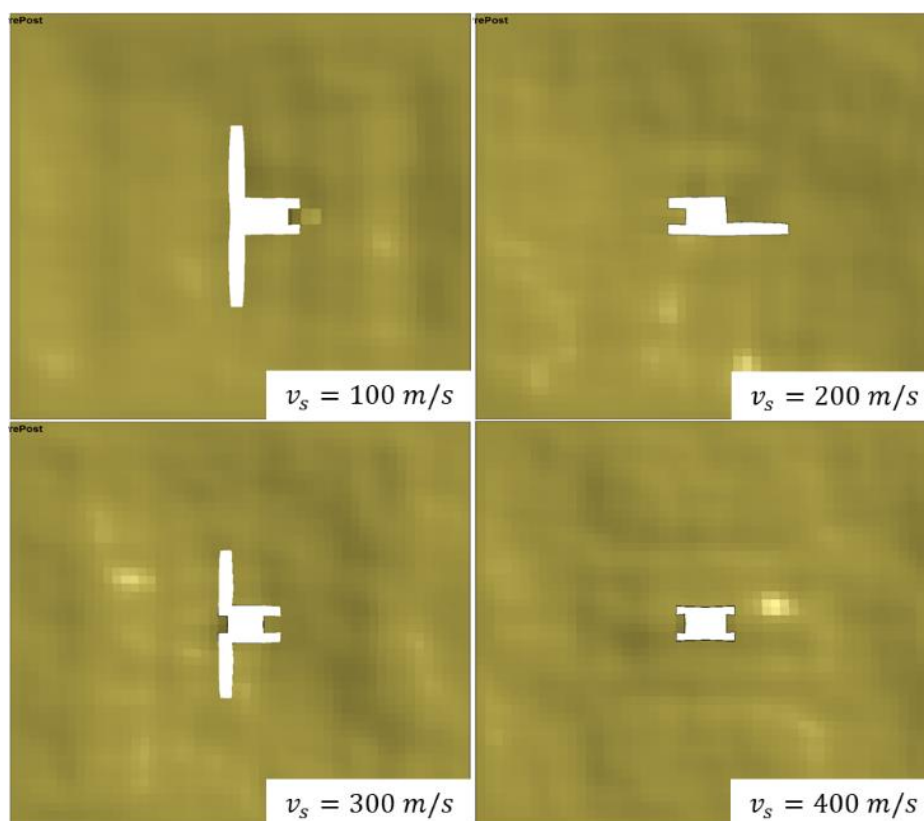
Simulace střelby do jedné vrstvy tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 50 - 500 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.18. Na Obr. 8.39 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Pro jednu vrstvu tkaniny nedochází k razantnímu nestabilnímu porušování modelu.

Tabulka 8.18 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

$v_s \text{ [m/s]}$	50	100	200	300	400	500
$v_r \text{ [m/s]}$	0	62	182	287	390	492



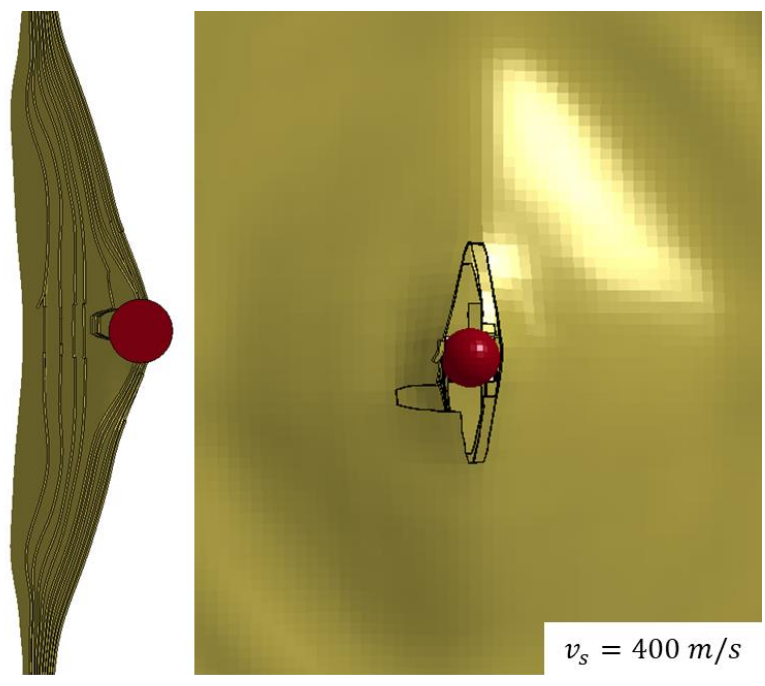
Obr. 8.39 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny

Simulace střelby do deseti vrstev tkaniny

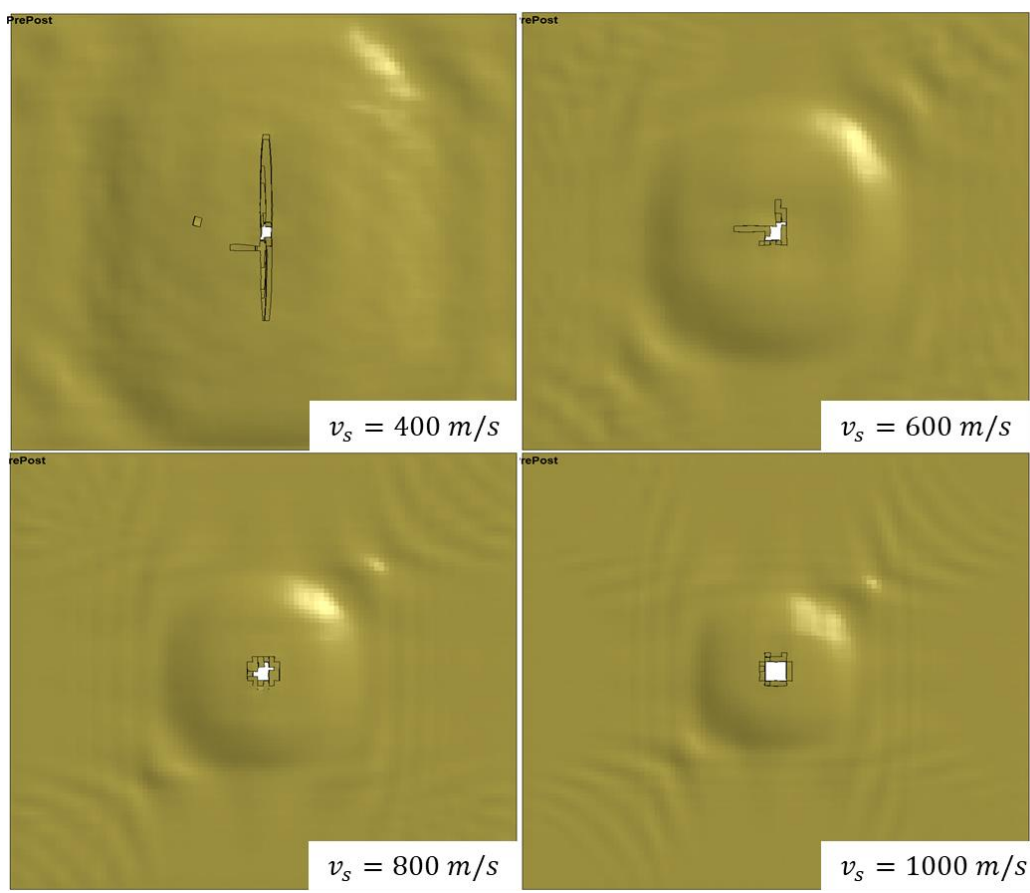
Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 200 - 1000 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.19. Na Obr. 8.41 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Tabulka 8.19 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

$v_s \text{ [m/s]}$	200	300	350	400	600	800	1000
$v_r \text{ [m/s]}$	0	0	0	197	502	721	932



Obr. 8.40 Simulace střelby, $v_s = 400 \text{ m/s}$



Obr. 8.41 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny

Pro model deseti vrstev tkaniny nedojde k nestabilnímu porušování, kromě rychlosti 400 m/s. V tomto případě dojde k nestabilnímu porušení zadní vrstvy, které se nakonec ustálí. Nicméně toto porušení není nijak razantní.

8.3.7 *MAT_DRY_FABRIC (*MAT_214)

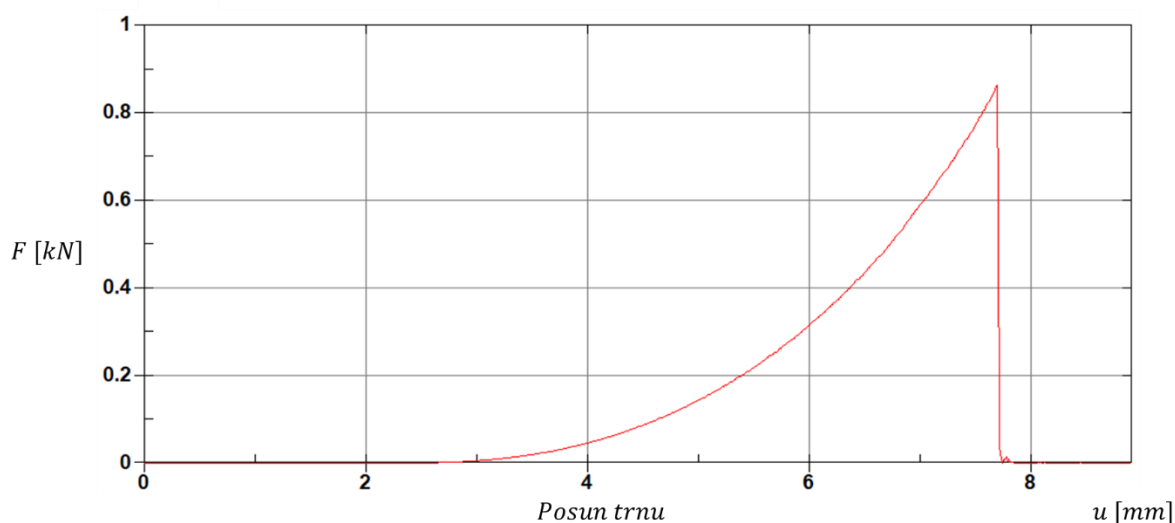
Pro tento model jsou využity membránové elementy s plnou integrací. Model materiálu vyžaduje data, která není možné stanovit na základě dostupných experimentů. Z tohoto důvodu se při určení těchto parametrů vycházelo z literatury [39]. Při volbě jednotlivých parametrů byly respektovány rozdílné vlastnosti v jednotlivých směrech tkaniny, nicméně toto vedlo k velikým nestabilitám modelu. Z tohoto důvodu jsou uvažovány vlastnosti tkaniny ve směru úteku a osnovy jako totožné. Vybrané materiálové parametry jsou uvedeny v Tabulka 8.20. U modelu tkaniny je uvažováno tlumení, a to ve formě Rayleighova koeficientu tlumení o hodnotě 0,05.

Tabulka 8.20 Materiálové parametry

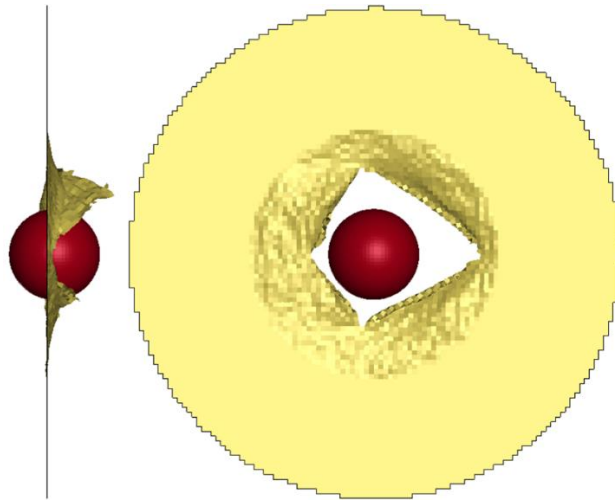
E_a, E_b [GPa]	G_{ab3}, G_{bc}, G_{ac} [GPa]	$\epsilon_{i,max}$ [-]	ϵ_{erosin} [-]	$\epsilon_{i,fail}$ [-]
9,70	0,5	0,065	0,35	0,2

Simulace zkoušky protlačení trnem

Materiálové parametry jsou optimalizované tak, že k protržení dojde při síle $F = 865 \text{ N}$ a posuvu $u = 7,7 \text{ mm}$. Po dosažení maximální síly se model začne porušovat nestabilně což je možné vidět na Obr. 8.43.



Obr. 8.42 Závislost síly na posuvu trnu



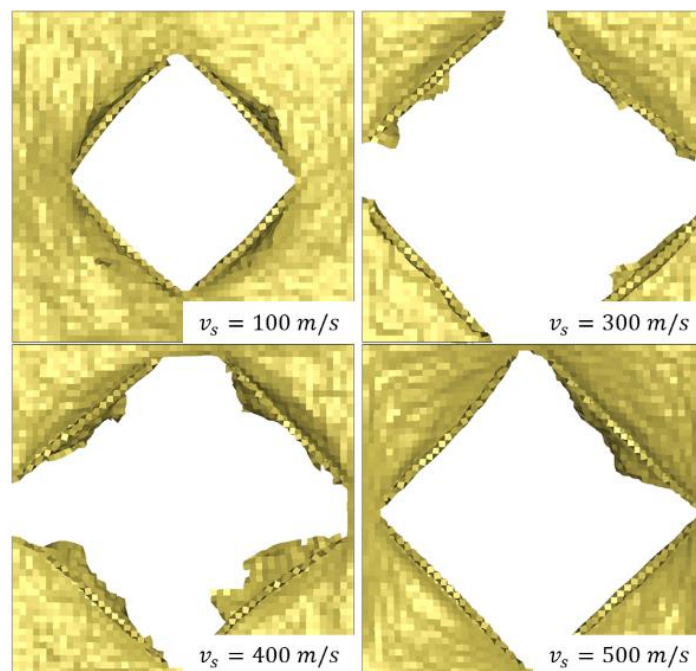
Obr. 8.43 Model tkaniny po protržení

Simulace střelby do jedné vrstvy tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 50 - 500 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.21. Na Obr. 8.44 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny. Po průstřelu tkaniny dojde k nestabilnímu porušení a přetržení celého modelu. Toto svědčí o nestabilitě modelu při porušení.

Tabulka 8.21 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	50	100	200	300	400	500
v_r [m/s]	0	48	170	278	395	497



Obr. 8.44 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny

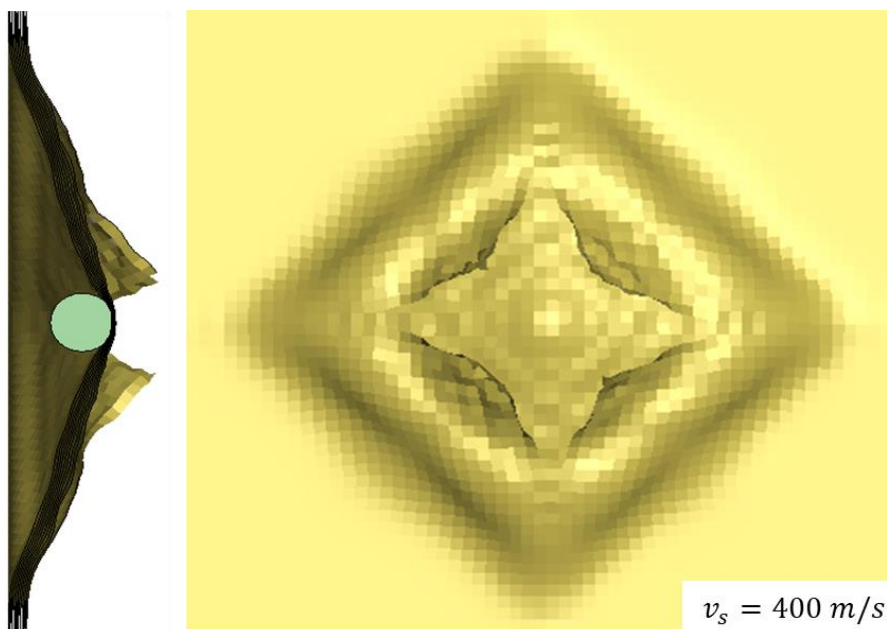
Simulace střelby do deseti vrstev tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 200 - 1000 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.22. Na Obr. 8.46 a Obr. 8.39 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

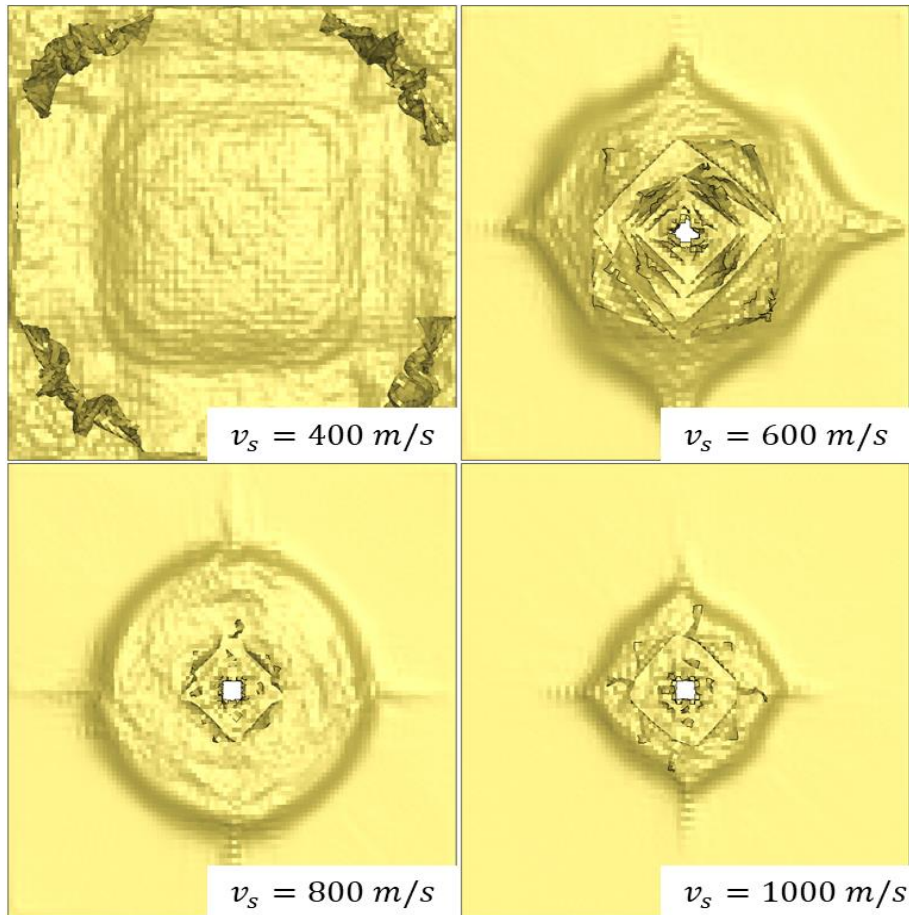
Pro deset vrstev tkaniny a rychlosti střely 400 m/s (Obr. 8.45) nedojde k průstřelu, ale zadní vrstvy se poruší a následně celé přetrhnou. Pro zbylé rychlosti se rovněž zadní vrstvy po průstřelu chovají nestabilně. Tyto nežádoucí efekty se nepodařilo eliminovat optimalizačním procesem.

Tabulka 8.22 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	200	300	400	500	600	800	1000
v_r [m/s]	0	0	0	0	522	758	949



Obr. 8.45 Simulace střelby, $v_s = 400 \text{ m/s}$



Obr. 8.46 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny

8.3.8 *MAT_MICROMECHANICS_DRY_FABRIC (MAT_235)

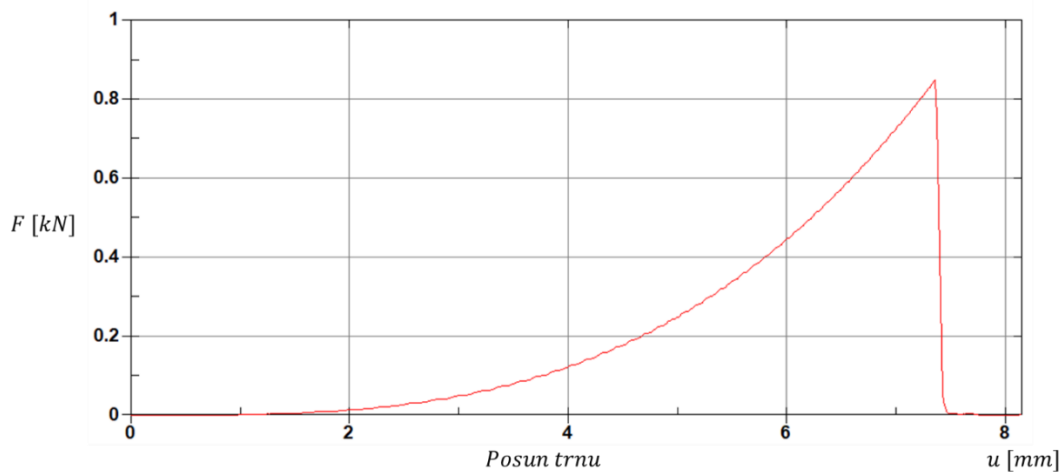
Pro tento model jsou využity membránové elementy s plnou integrací. Model vychází z mikromechanické struktury tkaniny. Parametry popisující geometrii tkaniny jsou stanoveny na základě MESO-modelu (Kap. 8.1) a dle doporučených hodnot v manuálu [30]. Model neumožňuje rozdílné vlastnosti tkaniny ve směru útku a osnovy. Model zahrnuje podmínku porušení v podobě maximálního napětí σ_{max} . U modelu tkaniny je uvažováno tlumení, a to ve formě Rayleighova koeficientu tlumení o hodnotě 0,05. Vybrané materiálové parametry jsou uvedeny v Tabulka 8.23.

Tabulka 8.23 Materiálové parametry

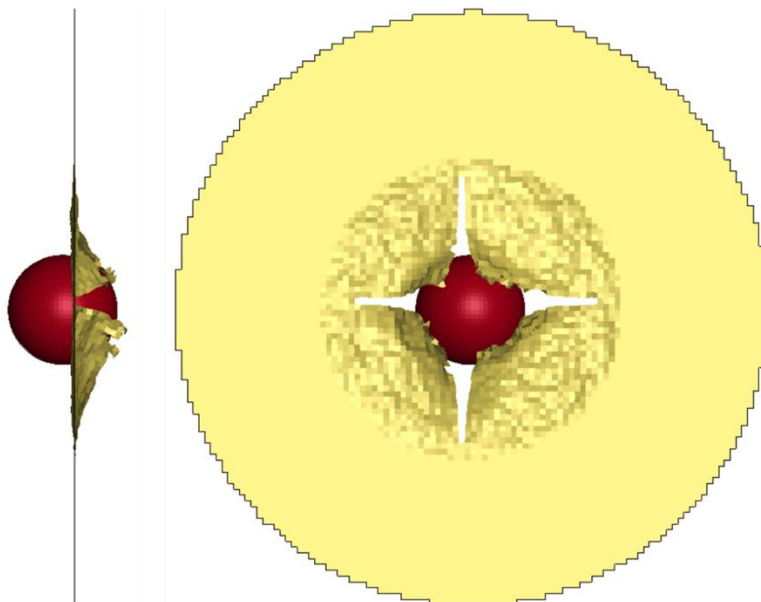
E_a, E_b [GPa]	G_{ab}, G_{bc} GPa]	μ_{12}, μ_{23}	σ_{max} [MPa]
7,40	0,6	0,15	480

Simulace zkoušky protlačení trnem

Materiálové parametry jsou optimalizované tak, že k protržení dojde při síle $F = 851 \text{ N}$ a posuvu $u = 7,4 \text{ mm}$.



Obr. 8.47 Závislost síly na posuvu trnu



Obr. 8.48 Model tkaniny po protržení

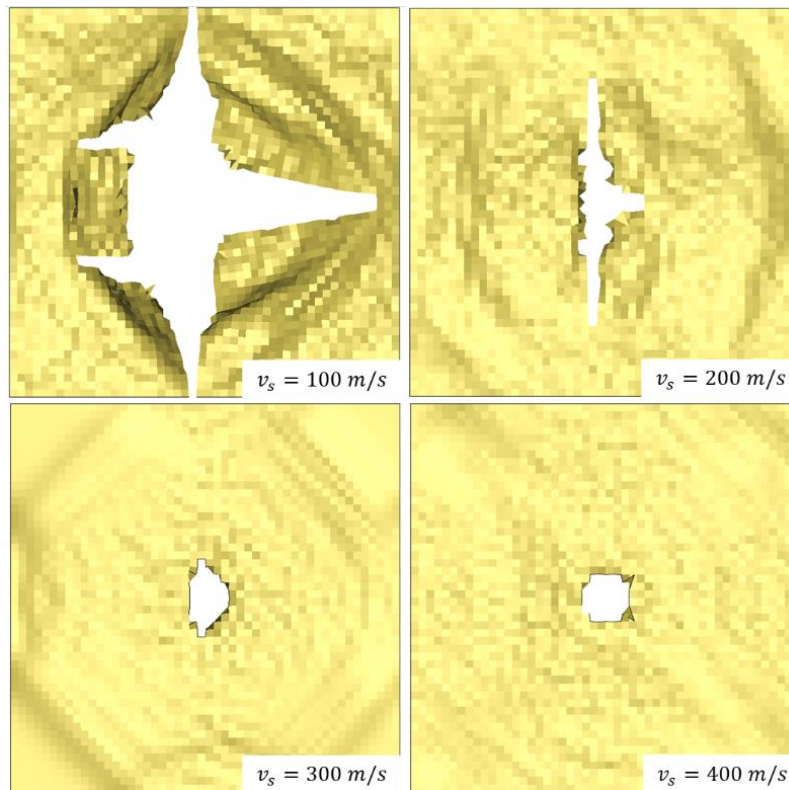
Simulace střelby do jedné vrstvy tkaniny

Simulace střelby je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 40 - 500 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.24. Na Obr. 8.49 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Tabulka 8.24 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	40	50	100	200	300	400	500
v_r [m/s]	0	7	75	193	298	397	497

Při interakci tkaniny a střely dojde ke kompletnímu přetržení tkaniny pro rychlost střely 100 m/s. Při vyšších rychlostech dojde rovněž k nestabilnímu šíření porušování, nicméně ne tak razantnímu.



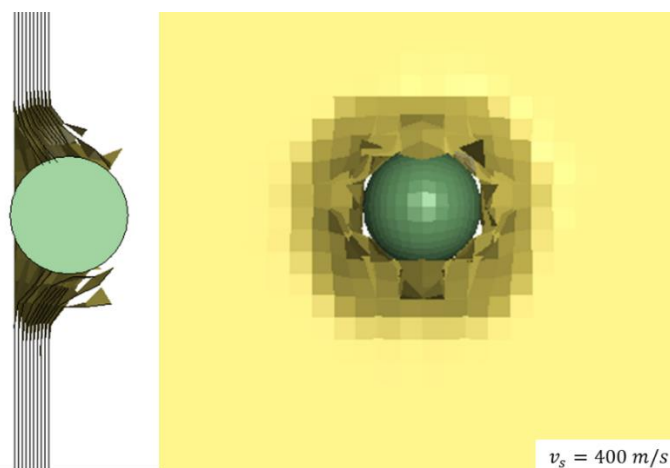
Obr. 8.49 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny

Simulace střelby do deseti vrstev tkaniny

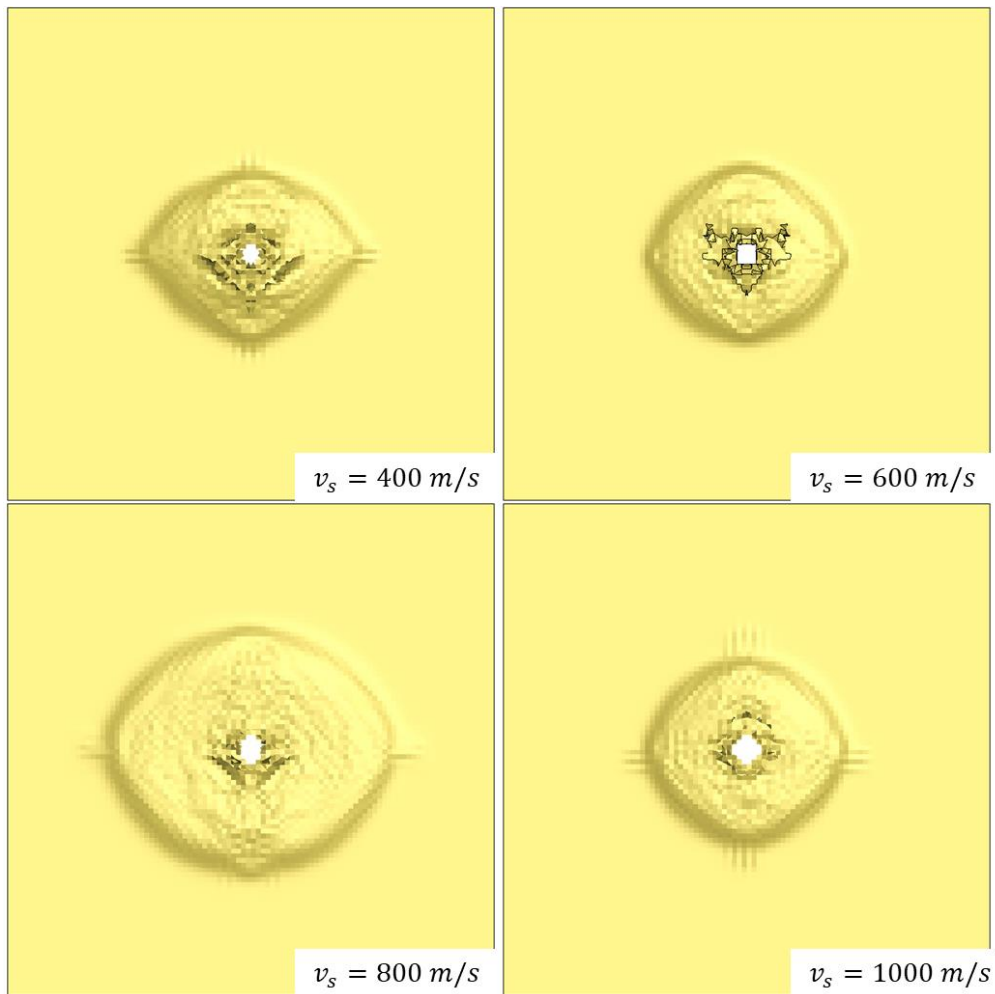
Simulace střelecké zkoušky je provedena pro rozsah rychlostí $v_s = 150 - 1000 \text{ m/s}$. Hodnoty počátečních v_s a residuálních rychlostí v_r jsou v Tabulka 8.25. Na Obr. 8.51 je možné vidět tkaninu po průstřelu pro dané rychlosti v_s . Obrázky jsou vykresleny vždy po dostatečně dlouhé době, kdy dojde k ustálení tkaniny.

Tabulka 8.25 Počáteční v_s a residuální v_r rychlosti

v_s [m/s]	150	200	300	400	600	800	1000
v_r [m/s]	0	134	273	376	573	766	962



Obr. 8.50 Simulace střelby, $v_s = 400 \text{ m/s}$



Obr. 8.51 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny

Při interakci střely a deseti vrstev tkaniny nedochází k již tak k razantně nestabilnímu porušování tkaniny jako pro jednu vrstvu při nižších rychlostech.

8.4 Zhodnocení výpočtových modelů

8.4.1 Srovnání výpočtových modelů z hlediska časové náročnosti

Následující Tabulka 8.26 shrnuje časovou náročnost výpočtů pro jednotlivé modely (MACRO metoda). Uvedené časy se vztahují k době výpočtu simulace protlačování a střelby do 10 vrstev tkaniny. Všechny výpočty jsou ukončeny v čase 10 ms (protlačování) nebo 0,05 ms (střelba do 10 vrstev). Všechny výpočty jsou realizované pro stejnou konfiguraci hardwaru a softwaru. Z uvedených časů je zřejmé, že pro objemové prvky je výpočet zhruba 3x časově náročnější. To je dáno velikostí časového kroku, kdy u objemových elementů je časový krok limitován nejmenším rozměrem prvku (výškou). Rovněž u modelů s jednodušším konstitutivním vztahem je doba výpočtu kratší. Nicméně uvedené časy je třeba brát pouze orientačně, neboť výpočetní čas je ovlivněn řadou dalších faktorů, jako jsou kontakty, porušování a vypadávání elementů a jiné. Lze tedy konstatovat, že výpočetní časy jsou řádově srovnatelné. Časový krok, a tedy i časovou náročnost výpočtu, může mnohdy ovlivnit model projektilu. Jelikož u deformovatelných projektilů se většinou používá menší velikost elementů, je tedy časový krok výpočtu závislý na modelu projektilu. Přehled hodnot časových kroků pro jednotlivé modely je rovněž uveden v Tabulka 8.26. Srovnáme-li uvedené časy protlačování s metodou MESO, kdy výpočet trval 360 hodin, jsou tyto časy diametrálně odlišné.

Tabulka 8.26 Srovnání dob výpočtů a časových kroků

Model materiálu	Typ prvků	Protlačování	Střelba 10 vrstev	Časový krok [μ s]
MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC	SHELL	10 min 27 s	1 min 5 s	$2,72 \cdot 10^{-1}$
	SOLID	33 min 41 s	3 min 29 s	$4,41 \cdot 10^{-2}$
MAT_PLASTIC_KINEMATIC	SHELL	14 min 13 s	1 min 23 s	$3,15 \cdot 10^{-1}$
	SOLID	31 min 5 s	3 min 10 s	$4,90 \cdot 10^{-2}$
MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE	SHELL	18 min 51 s	1 min 46 s	$2,67 \cdot 10^{-1}$
	SOLID	38 min 32 s	3 min 12 s	$4,33 \cdot 10^{-2}$
MAT_DRY_FABRIC	SHELL	14 min 11 s	1 min 45 s	$2,43 \cdot 10^{-1}$
MAT_MICROMECHANIC_DRY_FABRIC	SHELL	15 min 40 s	1 min 12 s	$2,62 \cdot 10^{-1}$

8.4.2 Zhodnocení výpočtových modelů z hlediska stability

Jednotlivé výpočtové modely jsou optimalizované tak, že u simulace protlačování dojde k protržení tkaniny při síle jejíž hodnota leží v intervalu $F \in (824; 865)$ a posuvu $u \in (7,4; 7,9)$. Tyto hodnoty leží, nebo jsou velice blízké hodnotám z experimentálních zkoušek (Kap. 7.2).

MAT ORTHOTROPIC ELASTIC (MAT 002)

Simulace průstřelů ukázaly, že se tento model při interakci se střelou porušuje nestabilně. Při určitých rychlostech střely se model poruší a následně se porušení šíří nestabilně celým modelem. Příčinou může být, že při porušení se uvolní energie, kterou není model schopen akumulovat a porušuje se dále nestabilně. Toto platí pro skořepinové i objemové prvky.

MAT PLASTIC KINEMATIC (MAT 003)

Tento model materiálu (objemové i skořepinové elementy) se při simulacích střelb prokázal jako vhodný pro simulace interakce střely a aramidové tkaniny. Po průstřelu nedocházelo k nestabilnímu porušování modelu. Srovnáním skořepinového a objemového modelu je více stabilní objemový model.

MAT ENHANCED COMPOSITE DAMAGE (MAT 054)

Při simulacích průstřelu nedochází k nekontrolovatelnému porušování modelu (objemové i skořepinové elementy). Tento model je tedy vhodný pro výpočtové modelování balisticky odolného laminátu tvořeného aramidovou tkaninou.

MAT DRY FABRIC (MAT 214)

V simulaci protlačení a střelb dochází k nestabilnímu porušování a přetrhnutí celého modelu (pro určité rychlosti). Tento model materiálu vyžaduje mnohé parametry, které je možné stanovit pouze na základě dostupné literatury. Nicméně tyto parametry by neměly mít zásadní vliv na stabilitu modelu při porušování. Z výsledků je patrné, že model se nejeví jako vhodný pro simulace balistické odolnosti, kdy dochází k porušování tkaniny při vysokých rychlostech.

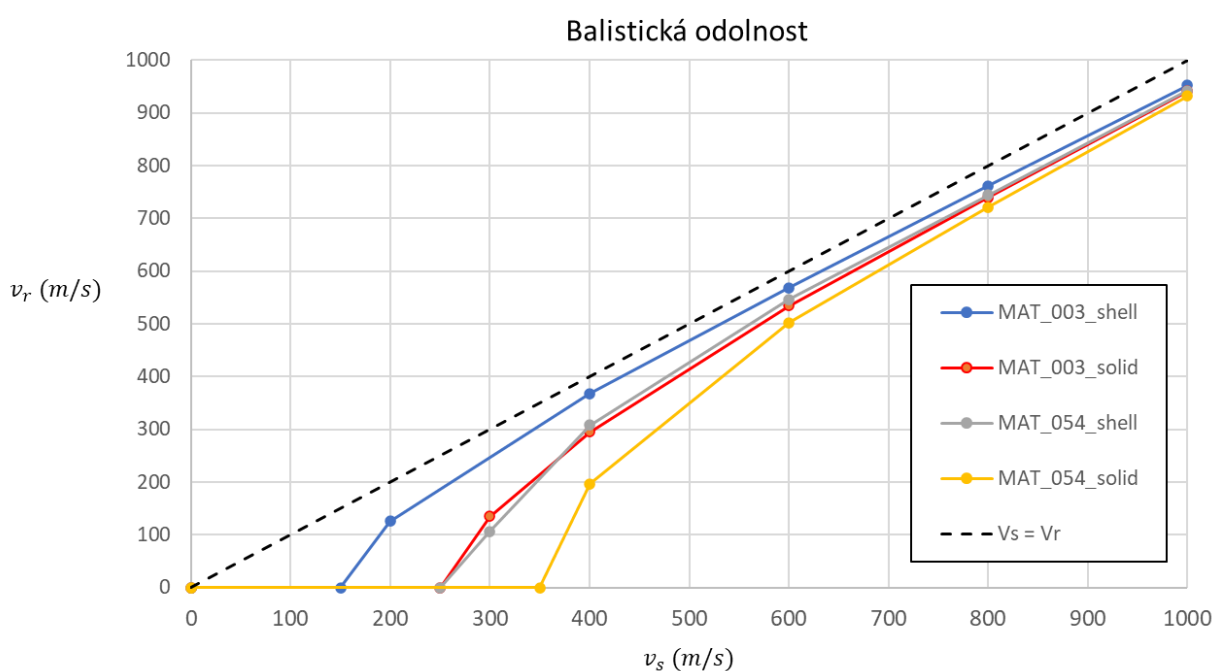
MAT MICROMECHANIC DRY FABRIC (MAT 235)

Při průstřelu v určitých rychlostech dochází k nestabilnímu porušování a přetrhnutí celého modelu. Tento model vychází z mikrostruktury tkaniny. Data potřebná pro popis chování tohoto modelu nebylo možné stanovit, a tudíž jsou stanovena dle dostupné literatury. Nicméně to by nemělo mít zásadní vliv na stabilitu modelu. Z výsledků je patrné, že model není vhodný pro simulace interakce střely a terče, kde dochází k porušování materiálu při vysokých rychlostech.

Na základě výše uvedeného zhodnocení modelů lze konstatovat, že modely MAT_003 a MAT_054 jsou vhodné pro modelování aramidové tkaniny při interakci se střelou.

8.4.3 Srovnání výpočtových modelů z hlediska balistické odolnosti

Na Obr. 8.52 je uvedeno srovnání křivek balistické odolnosti pro modely MAT_003 a MAT_054 (skořepinové i objemové elementy). Křivky jsou vykresleny pro simulaci střelby do 10 vrstev tkaniny. Ze srovnání vyplývá, že modely MAT_003_solid a MAT_054_shell si nejvíce odpovídají. Pro tyto modely vychází balistická limitní rychlost v intervalu $v_{50} = 250 - 300 \text{ m/s}$. Pro model MAT_003_shell je limitní rychlost v intervalu $v_{50} = 150 - 200 \text{ m/s}$, tedy o 100 m/s nižší nežli u MAT_003_solid a MAT_054_shell. U MAT_054_solid je tomu právě naopak, kdy limitní rychlost je v intervalu $v_{50} = 350 - 400 \text{ m/s}$. Bohužel pro tyto simulace nejsou dostupná experimentální data, na základě kterých by bylo možné lépe posoudit chování jednotlivých výpočtových modelů.



Obr. 8.52 Srovnání balistické odolnosti

Pro validaci bude využit výpočtový model MAT_054 pro skořepinové elementy. Tento model bude rovněž využit pro simulaci balistické ochrany. Důvody této volby jsou následující. Tento model vykazuje shodu s dalším výpočtovým modelem, a to s MAT_003_solid. Na základě předchozích simulací tento model prokázal vhodnost pro modelování balistiky odolného laminátu. Model umožňuje respektovat rozdílné mechanické vlastnosti materiálu v závislosti na směru zatížení.

9 Validace a aplikace výpočtového modelu

9.1 Simulace střelecké zkoušky do balistické plastelíny

Výpočtový model je validován na základě simulace střelecké zkoušky do balistické plastelíny, pro kterou jsou dostupná experimentální data (Kap. 7.3). Jelikož se tato zkouška využívá i pro posouzení balistické odolnosti měkké ochrany, jedná se rovněž i o aplikaci výpočtového modelu. Aby měkká ochrana (aramidová tkanina) splnila příslušný standard balistické odolnosti (NIJ 0101.04) [42], nesmí během střelecké zkoušky dojít k perforaci terče a hloubka vtisku do plastelíny nesmí být větší jak 45 mm.

V následujících pasážích je popsán MKP model pro tuto simulaci a následně je provedeno vyhodnocení výpočtového modelu a porovnání s experimentem.

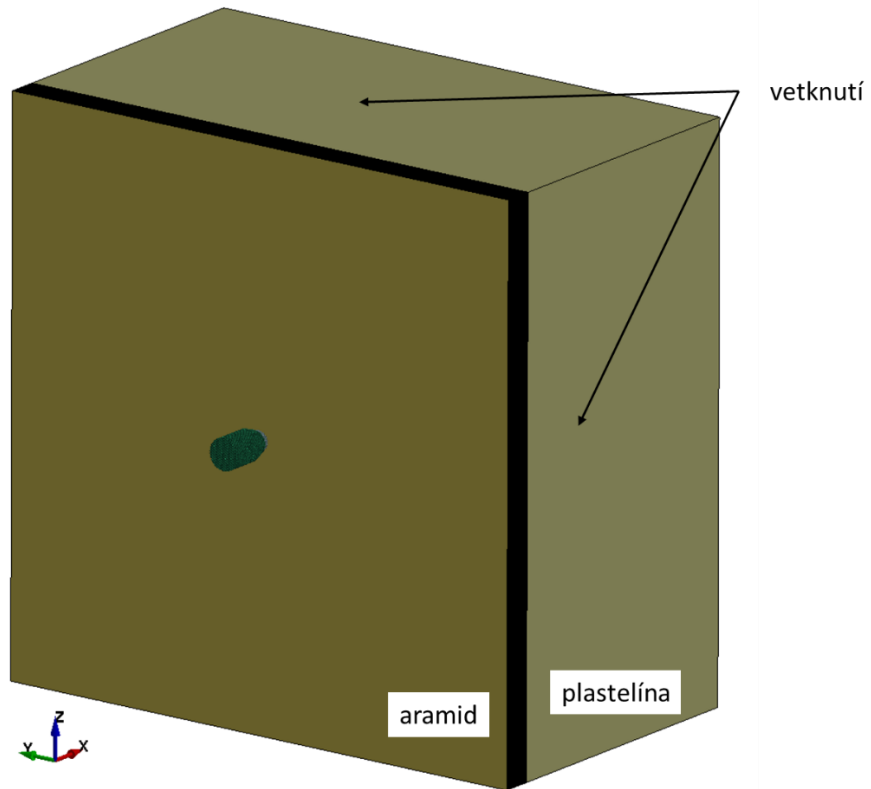
9.1.1 MKP model simulace střelby do balistické plastelíny

MKP model je vytvořen pro 60 vrstev tkaniny o rozměrech 200 x 200 x 0,17 mm, přičemž každá vrstva je modelovaná samostatně. Pro blok plastelíny je síť rozměrů 200 x 200 x 100 mm. Velikost elementu je 1 mm. Rozměry tkaniny a bloku plastelíny jsou zvoleny s ohledem na to, aby penetrační proces byl co nejméně ovlivněn okrajovými podmínkami a rovněž s ohledem na možnosti výpočetní kapacity. Ve skutečnosti byly tyto rozměry mnohem větší.

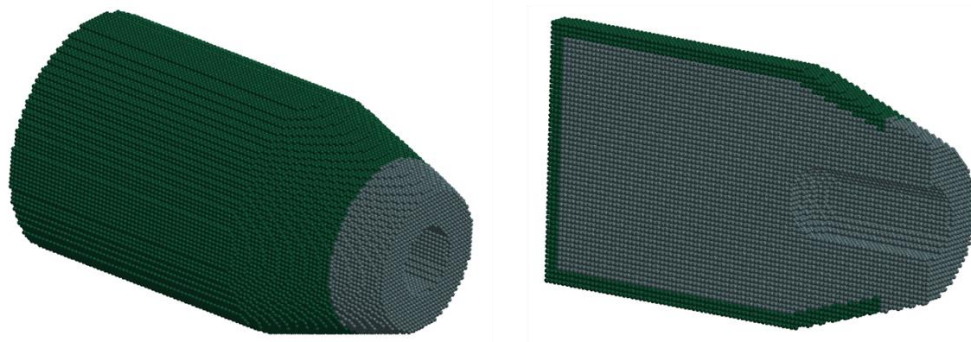
Projektíl ráže 0.44 Magnum SJHP je tvořen SPH metodou. Tato metoda je vhodná pro modelování materiálů s nízkou mezí kluzu, v případě že dochází k velikým deformacím a porušování. Pro model projektilu a balistické plastelíny je využito dostupných dat firmy SVS FEM s.r.o.

Projektilu je předepsaná počáteční rychlost 436 m/s a počáteční úhlová rychlost kolem vlastní osy $\omega = 4,7 \text{ rad/ms}$. Modelu plastelíny je po obvodu a zadní stěně předepsaná okrajová podmínka vetknutí (Obr. 9.1).

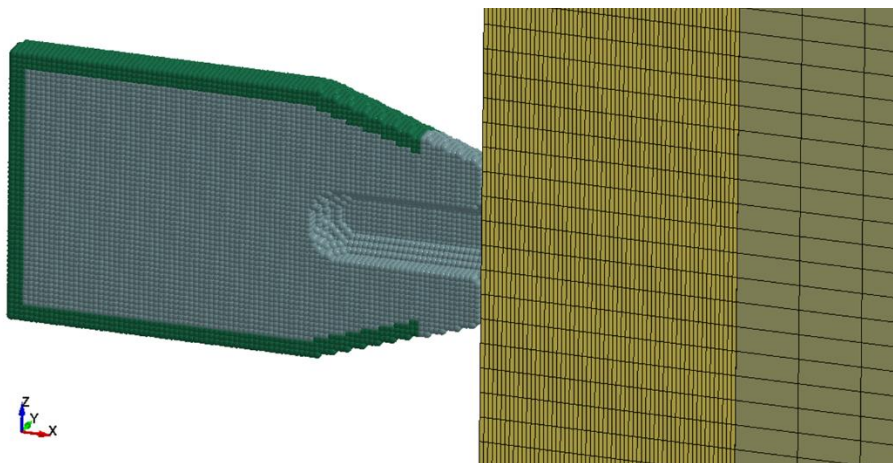
V úloze je zahrnut kontakt se třením mezi tkaninou a střelou a mezi jednotlivými vrstvami tkaniny. Hodnota statického f_s a dynamického f_d součinitele tření je $f_s = f_d = 0,2$. Dále je zahrnut kontakt mezi tkaninou a plastelínou.



Obr. 9.1 MKP model střelby do plastelíny



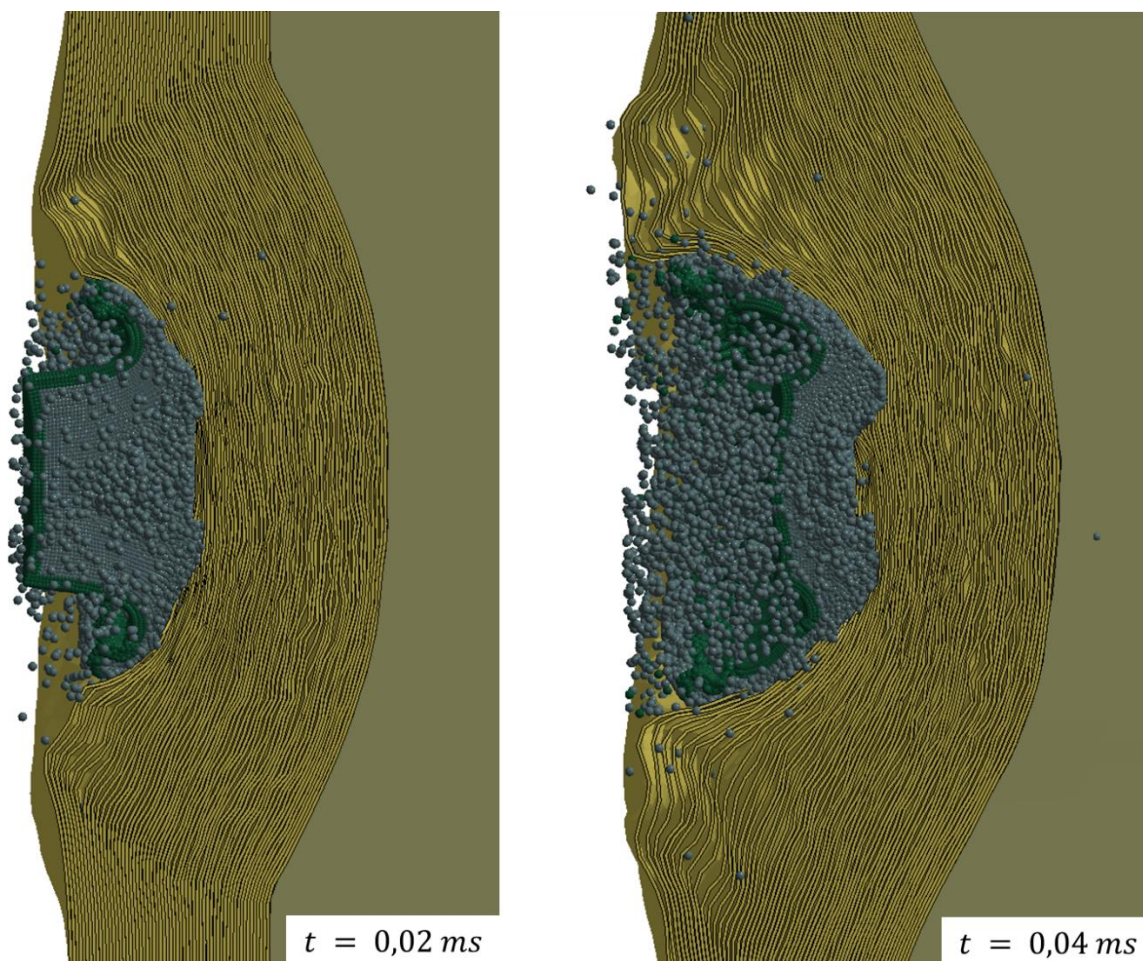
Obr. 9.2 Model projektilu ráže 0.44 Magnum SJHP



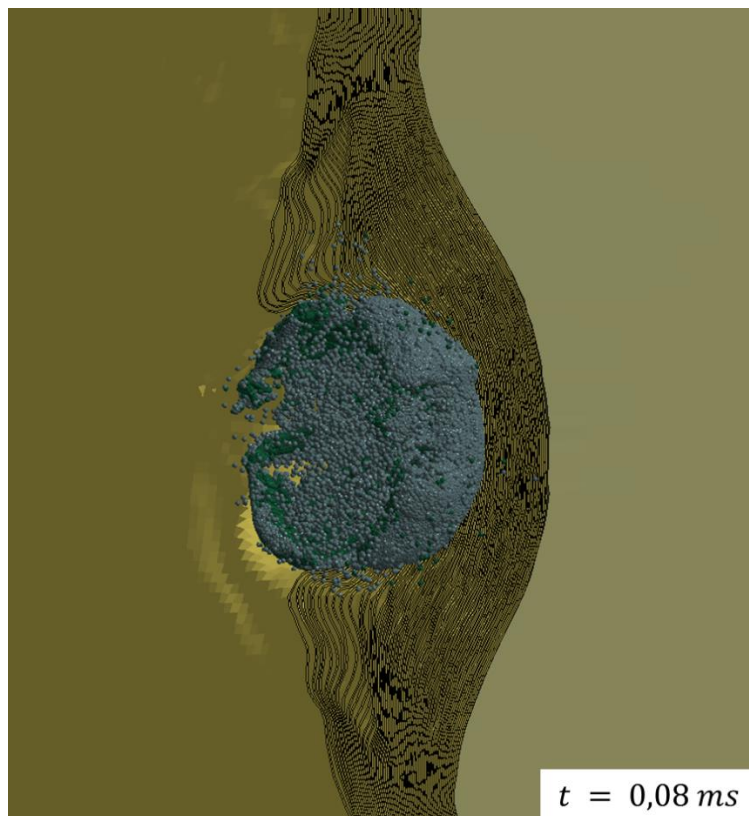
Obr. 9.3 Detail MKP modelu střelby do plastelíny

9.1.2 Vyhodnocení výpočtového modelu

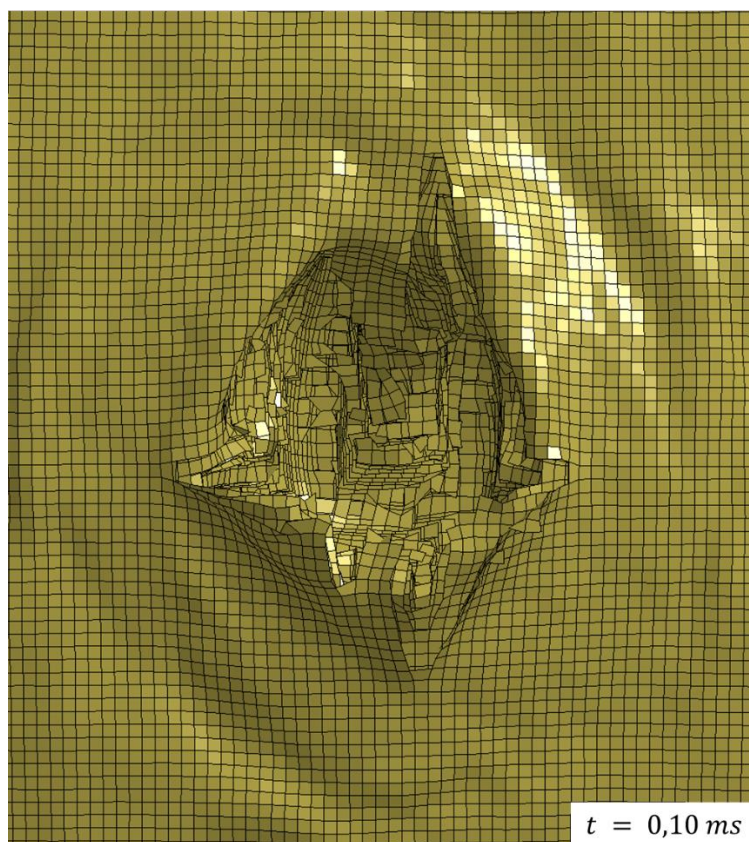
Během interakce dojde k porušení 32 vrstev tkaniny. Na Obr. 9.4 a Obr. 9.5 lze vidět průběh penetrace. Důsledkem interakce je zastavení projektilu a jeho značná deformace. Pro danou konfiguraci tedy nedojde k perforaci. Dalším důsledkem interakce je vtisk v plastelíně, jehož hloubka je 43 mm (Obr. 9.7). Průběh hodnoty hloubky vtisku v kritickém místě je znázorněn na Obr. 9.8. Hodnota hloubky vtisku pro výpočtový model je blízká hodnotám z experimentu (39,6 mm; 41,0 mm).



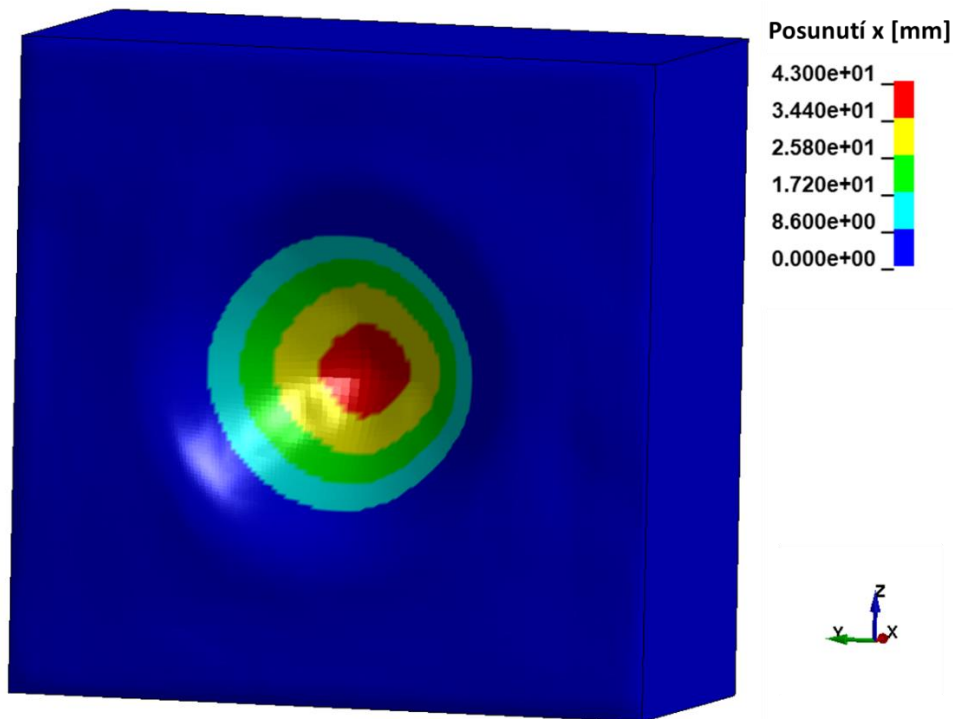
Obr. 9.4 Interakce projektilu a tkaniny



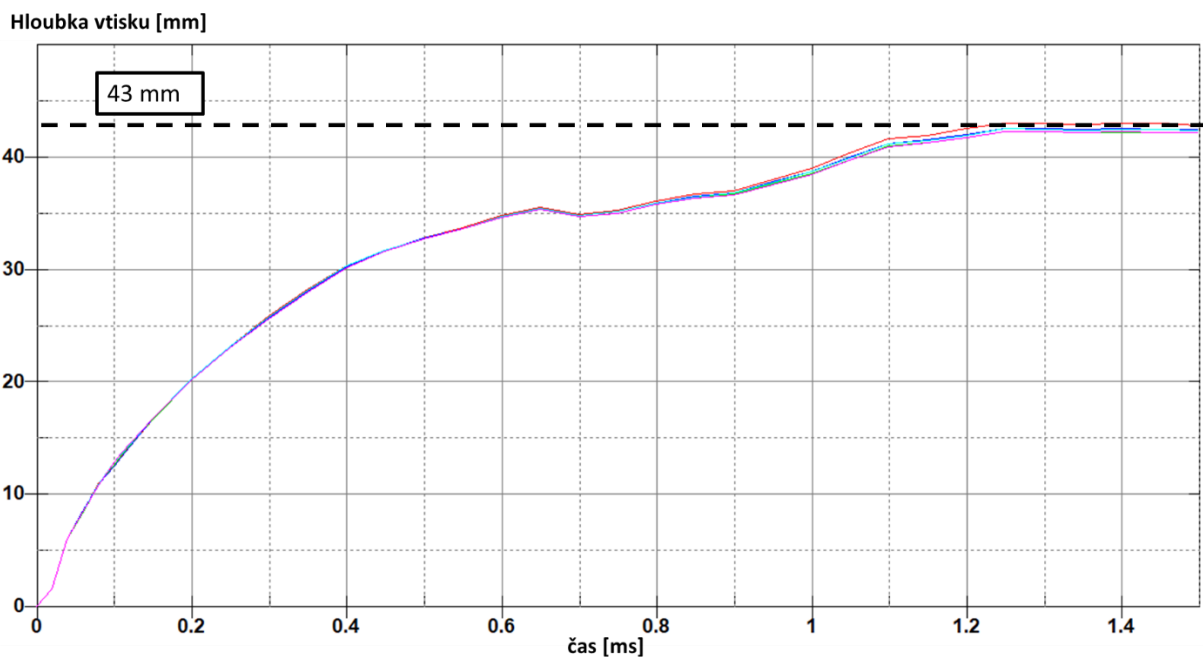
Obr. 9.5 Interakce projektilu a tkaniny



Obr. 9.6 Porušení tkaniny



Obr. 9.7 Hloubka vtisku v plastelině ($t=1,4$ ms)



Obr. 9.8 Průběh hloubky vtisku v plastelině

Na základě analýzy výpočtového modelu a srovnání s experimentem lze konstatovat, že výpočtový model je ve shodě s experimentem. Rovněž lze konstatovat, že výpočtový model aramidové tkaniny splnil standard balistické odolnosti NIJ 0101.04.

Tato simulace demonstruje možnost využití aramidové tkaniny ve formě měkké balistické ochrany. Dále tato simulace ukazuje možnost využití výpočtového modelu pro simulace balistické odolnosti.

9.2 Simulace interakce střepiny a tvrdé balistické ochrany

Jako balistická ochrana vozidel a konstrukcí se často využívá kombinace keramických a kovových plátů. Ty mohou být dále doplněny aramidovou tkaninou, jejíž smyslem je zachytit fragmenty, které vznikly v důsledku interakce střely s pancířem.

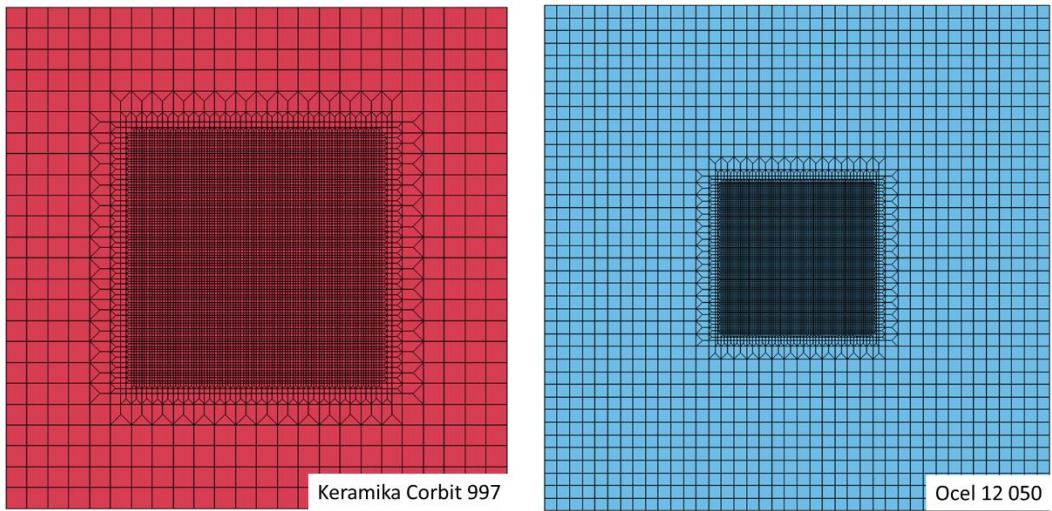
Aby bylo možné demonstrovat funkci aramidové tkaniny ve formě balistické ochrany, jsou vytvořené dva výpočtové modely, které simulují zkoušku balistické odolnosti výše uvedeného pancíře. Oba výpočtové modely obsahují model projektilu FSP 20, který se využívá jako simulátor dle standardu ČOS 130027 [43]. Projektil tvoří kalené ocelové jádro. Dále výpočtové modely obsahují model terče, který je tvořen balisticky odolnou keramikou Corbit 997 a ocelí 12 050. Druhý výpočtový model je navíc doplněn o model tkaniny, která má zabránit odlétávání fragmentů do okolí. Rozměry terče jsou zvoleny s ohledem na skutečné rozměry při těchto zkouškách. Rovněž je brán zřetel na to, aby nedocházelo k významnému ovlivnění modelu vlivem okrajových podmínek.

Rozměry terče:

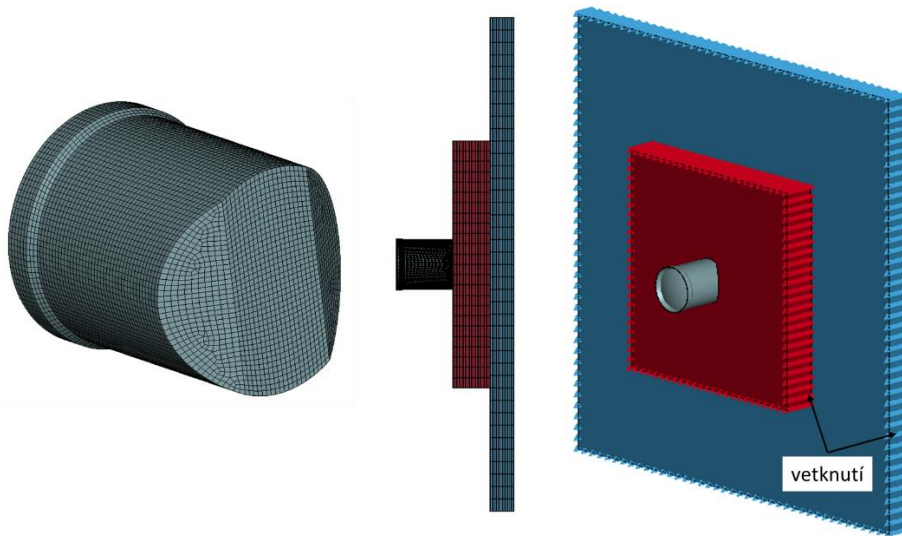
- Keramika: 100 x 100 x 15 mm
- Ocel: 200 x 200 x 10 mm
- Aramid: 15 vrstev - 400 x 400 x 0,17 mm (celková tloušťka 2,55 mm)

MKP model

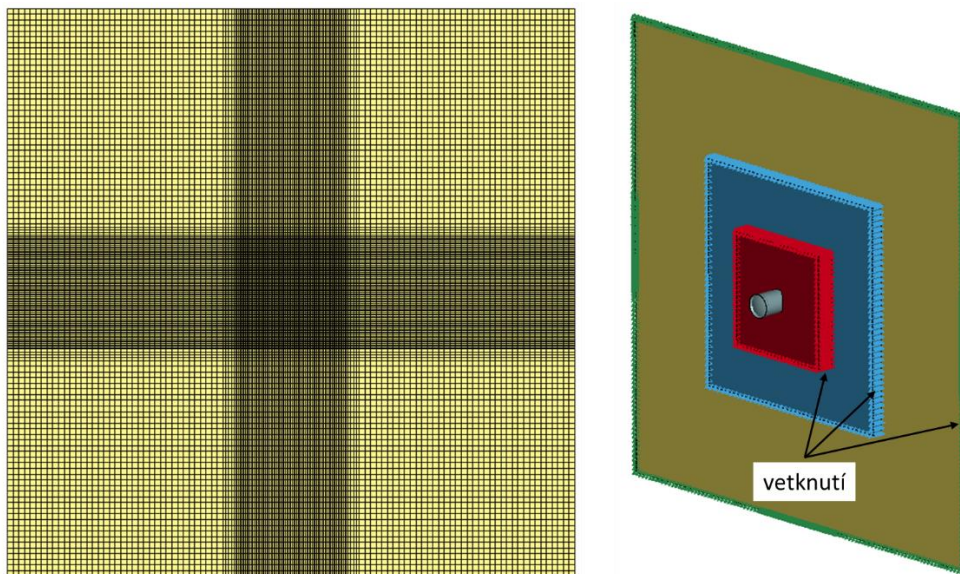
Síť v místě interakce je zjemněna na velikost prvku 0,5 mm pro model keramiky a oceli. Pro model aramidové tkaniny je síť zjemněna na velikost prvku 1 mm. Ve vzdálených místech od předpokládané interakce je velikost prvků větší (4 mm). Po obvodu modelu keramiky, oceli a tkaniny je předepsána okrajová podmínka vetknutí. Modelu projektilu je předepsaná počáteční rychlost $v_s = 730 \text{ m/s}$. Projektil je tvořen prvky o velikosti 0,5 mm. Projektil je umístěn tak, že dopadne kolmo na povrch terče. Tento směr je z hlediska účinnosti pancíře nejkritičtější. Síť včetně okrajových podmínek je možné vidět na Obr. 9.9, Obr. 9.10 a Obr. 9.11. Pro model projektilu, keramiky a oceli je využito dostupných modelů materiálu z archivu firmy SVS FEM s.r.o. Pro aramidovou tkaninu je využito model materiálu MAT_054 a skořepinové elementy (Kap. 8.3.5).



Obr. 9.9 Model sítě: keramika, ocel



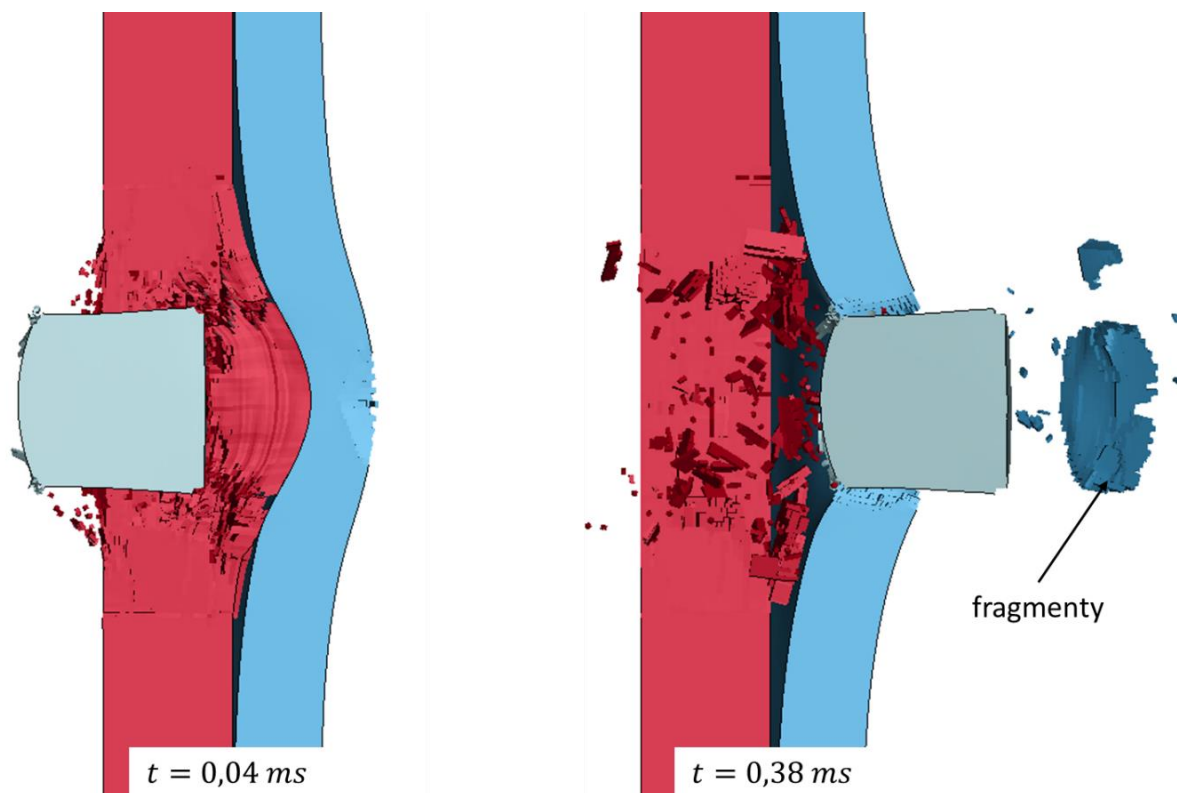
Obr. 9.10 Model sítě projektilu a terče + okrajové podmínky



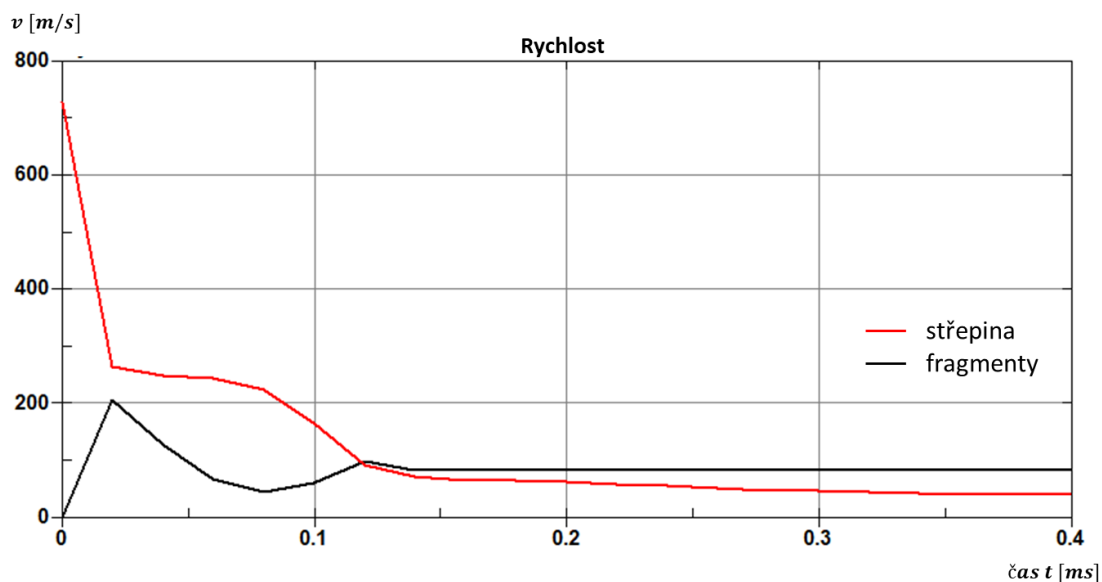
Obr. 9.11 Model sítě tkaniny, kompletní model + okrajové podmínky

9.2.1 Vyhodnocení výpočtového modelu bez aramidové tkaniny

Během interakce střely a terče dojde ke kompletní perforaci terče. Důsledkem interakce je vznik fragmentů, které se volně šíří do prostoru (Obr. 9.12). Residuální rychlost střepiny je $v_r = 41 \text{ m/s}$ a fragmentů $v_r = 82 \text{ m/s}$ (Obr. 9.13).



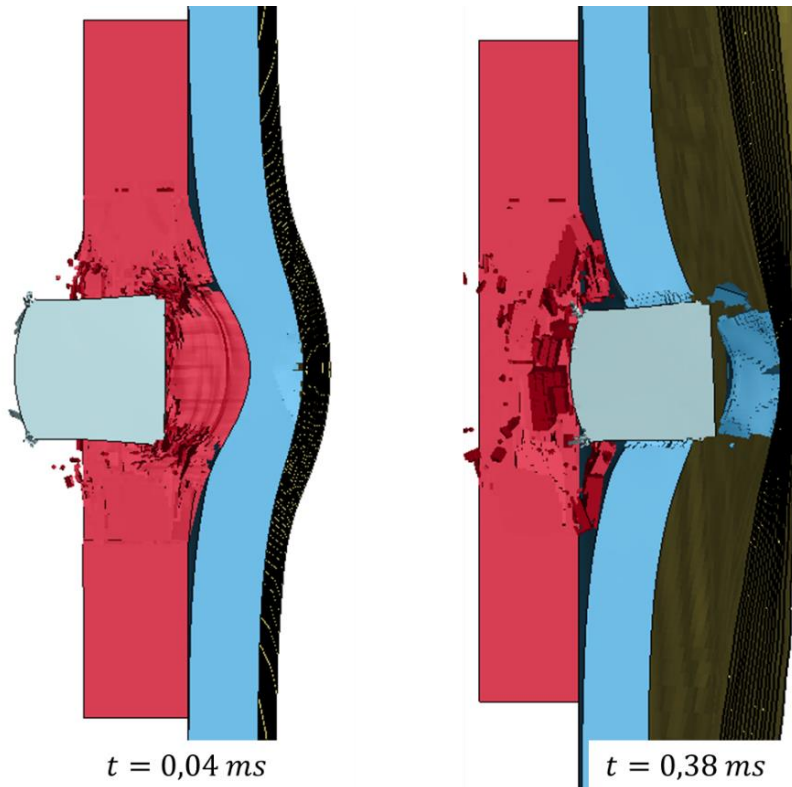
Obr. 9.12 Interakce střepiny a terče (bez aramidů), vznik fragmentů



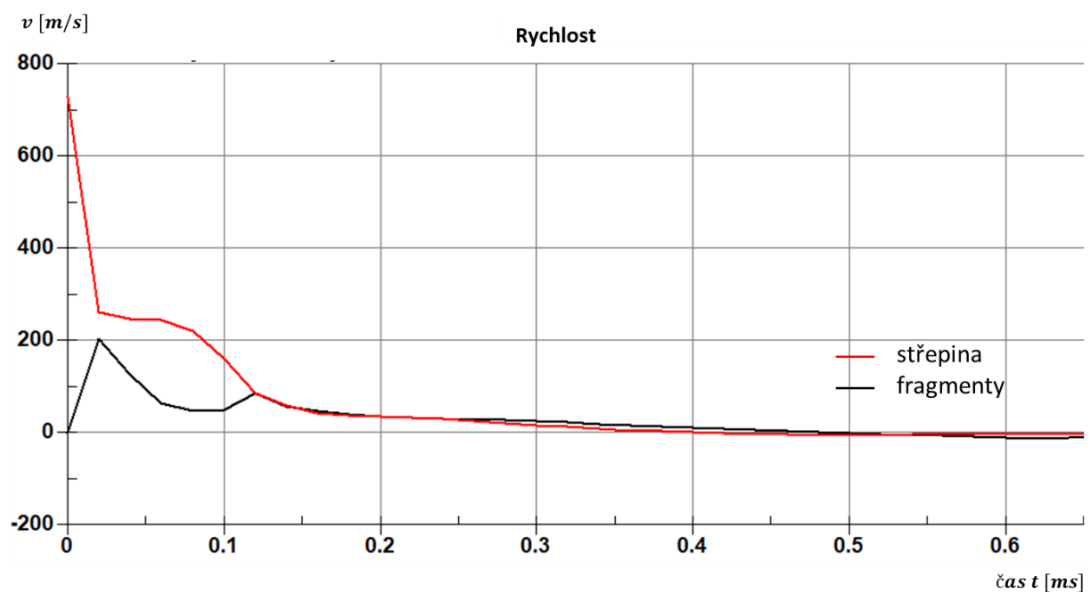
Obr. 9.13 rychlost střepiny a fragmentů

9.2.2 Vyhodnocení výpočtového modelu s aramidovou tkaninou

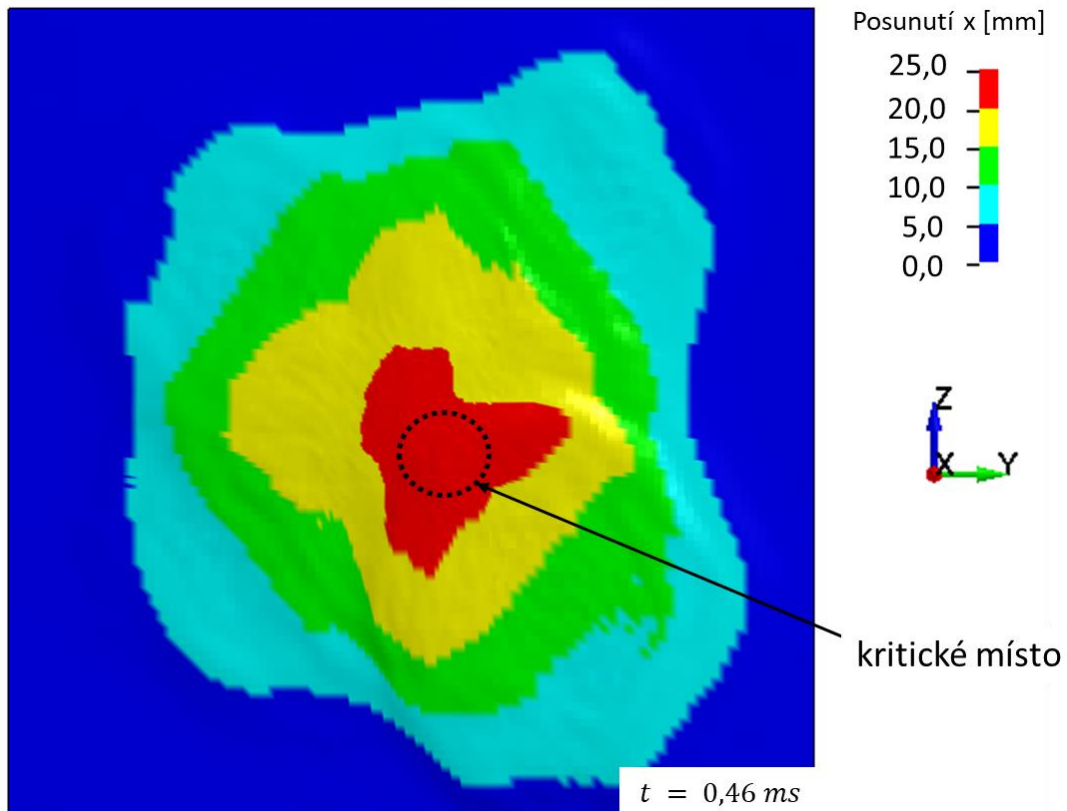
V tomto modelu je součástí terče navíc aramidová tkanina, která je umístěna do zadní části. Během interakce dojde ke kompletní perforaci keramiky a oceli a vzniku fragmentů. Aramidová tkanina následně zachytí a zastaví fragmenty a střepinu, přičemž nedojde k jejímu porušení. Důsledkem interakce je maximální posuv zadní vrstvy aramidu $u_x = 24,5 \text{ mm}$ (ve směru letu střely) (Obr. 9.16 a Obr. 9.17).



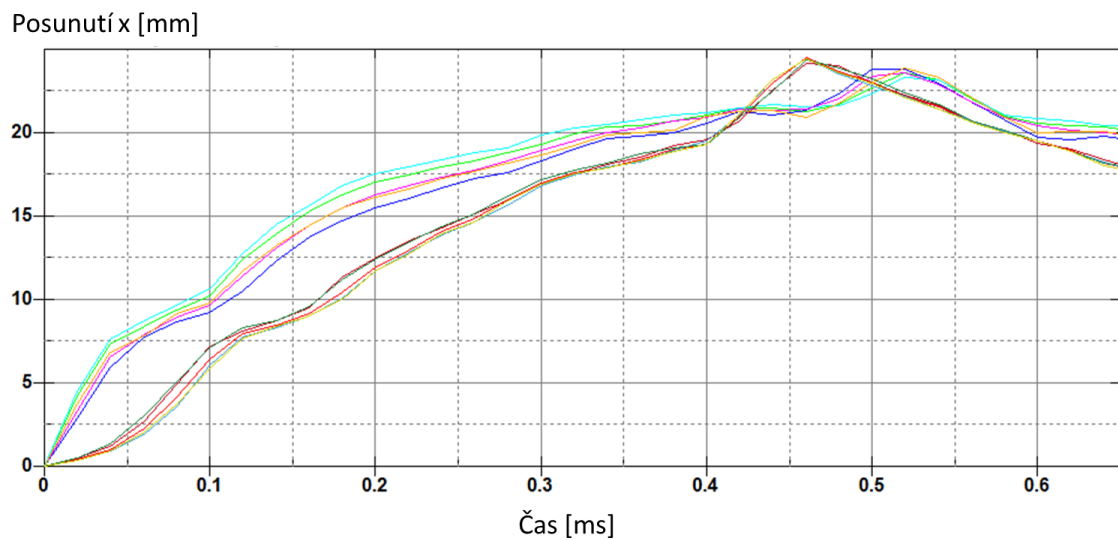
Obr. 9.14 Interakce střepiny a terče s aramidem, vznik fragmentů



Obr. 9.15 rychlost střepiny a fragmentů



Obr. 9.16 Posuv zadní vrstvy aramidu v čase $t = 0,46 \text{ ms}$



Obr. 9.17 Posunutí zadní vrstvy aramidu (kritická místa)

Tato simulace demonstruje vhodnost a využití aramidové tkaniny jako součást balistické ochrany a rovněž možnosti a využití výpočtového modelu aramidové tkaniny pro simulace balistické odolnosti.

10 Závěr

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na výpočtové modelování balisticky odolného laminátu na bázi polyamidových vláken. Cílem práce bylo vytvořit výpočtový model, který je schopen reflektovat chování aramidové tkaniny během interakce se střelou.

Samotnému řešení problému této práce předchází komplexní rešeršní studie, která je rozdělena na dvě části. První částí je úvod do obecné problematiky řešeného problému (Kap. 4). Důvodem přítomnosti této části je to, aby bylo možné porozumět řešenému problému v širším kontextu. V této části jsou obsažena témata zaměřená na aramidová vlákna, jejich vlastnosti a využití. Poté je popsána terminální balistika, což je věda, která se zabývá interakcí střely a terče a procesy, jež souvisí s touto interakcí. Dále jsou uvedeny základní konstitutivní vztahy a stručně popsána metoda konečných prvků v dynamice těles. Druhá část rešeršní studie je zaměřena na současné metody a možnosti výpočtového modelování balisticky odolných textilií (Kap. 5). Z hlediska úrovně modelování textilie se nejčastěji využívají metody MESO, MACRO a jejich vzájemná kombinace. Dále v této části jsou popsány dostupné modely materiálu v LS-DYNA, které jsou teoreticky vhodné pro modelování balisticky odolné textilie (Kap. 6).

Hlavní část práce je zaměřena na vývoj výpočtového modelu balisticky odolné tkaniny. Během vývoje jsou využity metody MESO a MACRO. Dále v rámci metody MACRO je využito více modelů materiálu a různé druhy elementů (Kap. 8). V rámci vývoje výpočtového modelu jsou využita data z experimentů, která sloužila pro stanovení a optimalizaci materiálových parametrů. Řadu materiálových parametrů nebylo možné stanovit na základě experimentálních zkoušek, a tudíž byly stanoveny na základě dostupné literatury. V rámci vývoje bylo provedeno velké množství simulací, pomocí kterých bylo možné optimalizovat jednotlivé modely a vzájemně je porovnat. Na základě provedených simulací lze konstatovat, že MESO metoda je časově velmi neefektivní, kdy doba výpočtu je o několik řádů vyšší oproti metodě MACRO, což je v souladu s literaturou. Dále byly srovnány jednotlivé modely pro metodu MACRO, a to z hlediska časové náročnosti a stability modelu z hlediska porušování. Na základě analýz jednotlivých výpočtových modelů se pro modelování balistiky odolného laminátu jeví jako vhodné modely MAT_003 a MAT_054 (pro skořepinové i objemové elementy). Pro validaci byl vybrán model MAT_054 pro skořepinové elementy. Tento model je schopen reflektovat mechanické vlastnosti tkaniny v závislosti na směru zatížení. Dále u tohoto modelu nedochází k nestabilnímu porušení během penetrace.

Pro vybraný výpočtový model byla provedena validace srovnáním s dostupným experimentem (Kap. 7.3 a Kap. 9). Validace prokázala, že výpočtový model je ve shodě s experimentem, a je tedy schopen reflektovat skutečné chování aramidové tkaniny. Pro validaci byla využita zkouška dle standardu NIJ 0101.04, která se využívá pro stanovení balistické odolnosti měkké balistické ochrany. Z tohoto důvodu se rovněž jedná i o aplikaci výpočtového modelu.

Validovaný výpočtový model byl rovněž použit pro komplexní simulaci, kterou lze využít pro posouzení balistické odolnosti bezpečnostního prvku pro ochranu vozidel, konstrukcí, potažmo osob. Tato simulace demonstruje vhodnost využití aramidové tkaniny jako součástí balistické ochrany a rovněž možnosti využití výpočtového modelu pro simulace balistické odolnosti.

Výsledkem diplomové práce je výpočtový model aramidové tkaniny, který je možné použít pro simulace balistické odolnosti ochranných prvků. Pokud by byly provedeny další experimentální zkoušky, bylo by možné na jejich základě optimalizovat a zpřesnit výpočtový model.

11 Seznam použité literatury

- [1] JANÍČEK, Přemysl. Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí: učební texty. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3544-5.
- [2] Aramid. Wikipedia: the free encyclopedia. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Aramid>
- [3] Aramidová vlákna. Wikipedia: the free encyclopedia. Dostupné také z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Aramidov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [4] Materiály. In: Veba.cz [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <http://www.veba.cz/cs/materialy>
- [5] Product brochure Twaron. In: Teijinaramid.com [online]. 2018 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2018/10/Product_brochure_Twaron.pdf
- [6] Ballistic materials handbook. In: Teijinaramid.com [online]. 2019 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2019/11/TEIJ_Handbook_Ballistics_2019_DEF.pdf
- [7] Textilie. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Textilie>
- [8] Caramilla: látky [online]. 2019 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.caramilla.cz/látky/>
- [9] Ceramic & Composite Armor Protection Principles. In: Defense-update.com [online]. 2005 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://defense-update.com/20051025_armor-principles.html
- [10] VRBKA, Jan. Mechanika Kompozitů. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008.
- [11] Efunda: Mechanics of Materials [online]. 2020 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.efunda.com/>
- [12] PETRUŠKA, Jindřich. MKP v inženýrských výpočtech, Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
- [13] FUSEK, Martin a Radim HALAMA, MKP a MHP: Matematika pro inženýry 21. století [online], Ostrava, 2011 [cit. 2020-03-22], Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecnych_prvku_a_hrani_cnich_prvku.pdf

- [14] Livermore Software Technology: LS-DYNA [online]. c2011-2019 [cit. 2020-03-22].
Dostupné z: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>
- [15] Balistika. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. [cit. 2020-03-22].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Balistika>
- [16] JANKOVÝCH, Róbert. Hlavňové zbraně a střelivo. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT, 2012. ISBN 978-80-260-2384-5.
- [17] ROSENBERG, Zvi a Erez DEKEL. Terminal Ballistic. Berlin: Springer, 2012. ISBN 978-3-642-25304-1.
- [18] BUCHAR, Jaroslav a Josef VOLDŘICH. Terminální balistika. Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1222-2
- [19] DENIZ, Tansel. Ballistic penetration of hardened steel plates. Ankara, 2010. Master Thesis. Middle East Technical University. Vedoucí práce Prof. Dr. R. Orhan Yıldırım.
- [20] MOSSAKOVSKY, Pavel A. et al. Experimental Investigation and FE Analysis of Fibre Woven Layered Composites Under Dynamic Loading. In: Dynalook.com [online]. Moscow, 2012 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.dynalook.com/conferences/12th-international-ls-dyna-conference/constitutivemodeling12-c.pdf>
- [21] RAO, M. P. et al. Global/Local Modeling of Ballistic Impact onto Woven Fabrics. Journal of Composite Materials [online]. 2009, (43), 445 - 467 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1177/0021998308097684. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998308097684>
- [22] HA-MINH, Cuong et al. Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact. Computational Materials Science [online]. 2011, (50), 2172-2184 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1016/j.commat.2011.02.029. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025611001194>
- [23] NILAKANTAN, Guarav. Filament-level modeling of Kevlar KM2 yarns for ballistic impact studies. Composite Structures [online]. 2013, 2013(104), 1 - 13 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/journal/composite-structures>
- [24] CHEESEMAN, Bryan A. a Travis A. BOGETTI. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. Composite Structure [online]. 2003, (61), 161 - 173 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00029-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822303000291>

- [25] SCAZZOSI, R. et al. Two different modelling approaches for fabric composites subjected to ballistic impact. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 406. 012051 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1088/1757-899X/406/1/012051. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/406/1/012051>
- [26] BRESCIANI, L. M. et al. Experimental tests and numerical modelling of ballistic impacts against Kevlar 29 plain-woven fabrics with an epoxy matrix: Macro-homogeneous and Meso-heterogeneous approaches. Journal of Composite Materials [online]. 2016, (88), 114 - 130 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.10.039. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836815006691>
- [27] DÖBRICH, Oliver, Thomas GEREKE a Chokri CHERIF. Textile and Composite Modelling on a near Micro-scale: Pos. In: Dynalook.com [online]. Dresden, Germany: Technische Universität Dresden, 2015 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.dynalook.com/conferences/10th-european-ls-dyna-conference/4%20Materials%20II%20-%20Endless%20Fibers/01-Doebrich-TechnicalUnivDresden-P.pdf>
- [28] LS-DYNA, LS-DYNA Theory manual [online], 2019 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf
- [29] LS-DYNA, LS-DYNA Keyword user's manual, Vol. I [online], 2020 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Vol_I.pdf
- [30] LS-DYNA, LS-DYNA Keyword user's manual, Vol. II [online], 2020 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Vol_II.pdf
- [31] HAUFE, André et al. Review of Shell Element Formulations. In: Dynamore.de [online]. Stuttgart: DYNAmore, 2013 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/2013-ls-dyna-forum/documents/review-of-shell-element-formulations-in-ls-dyna-properties-limits-advantages-disadvantages>
- [32] HARPER, Emory. Element Formulations and Accuracy. In: Slideplayer.com [online]. MSC software [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/6815805/23/>
- [33] SVS FEM. LS-DYNA: Základní školení - Explicit. Brno, 2018.

- [34] Vazby tkanin. Skolatextilu [online]. Brno [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/438/textilni-terminologie-zboziznalstvi/tkaniny/Vazby-tkanin.html>
- [35] EDDINE TRIA, Djalel et al. Experimental and numerical analysis of high and low velocity impacts against neat and shear thickening fluid (STF) impregnated weave fabrics. EPJ Web of Conferences [online]. 2018, 183 [cit. 2020-03-23]. DOI: 10.1051/epjconf/201818301044. ISSN 2100-014X. Dostupné z: <https://www.epj-conferences.org/10.1051/epjconf/201818301044>
- [36] GIANNAROS, E. et al. On fabric materials response subjected to ballistic impact using meso-scale modeling. Numerical simulation and experimental validation. Composite Structures [online]. 2018, 204, 745-754 [cit. 2020-03-23]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.090. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822318305439>
- [37] KUBÍK, P. Implementace, kalibrace a využití podmínek tvárného lomu v programech MKP. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 106 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc..
- [38] KEVLAR ARAMID FIBER TECHNICAL GUIDE.
In: <https://www.dupont.com/brands/kevlar.html> [online]. 2017 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: https://www.r-g.de/w/images/b/bd/Kevlar_Technical_Guide.pdf
- [39] RAJAN, S.D. Explicit Finite Element Modeling of Multilayer Composite Fabric for Gas Turbine Engine Containment Systems, Phase IV [online]. In: . Atlantic City, New Jersey: U.S. Department of Transportation, 2014 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/TC13-37.pdf>
- [40] EDDINE TRIA, Djalel et al. Experimental and numerical analysis of high and low velocity impacts against neat and shear thickening fluid (STF) impregnated weave fabrics. EPJ Web of Conferences [online]. 2018, 183 [cit. 2020-05-30]. DOI: 10.1051/epjconf/201818301044. ISSN 2100-014X. Dostupné z: <https://www.epj-conferences.org/10.1051/epjconf/201818301044>
- [41] GOMUC, Reha. Explicit Finite Element Modeling of Multilayer Composite Fabric for Gas Turbine Engine Containment Systems [online]. In: . Phoenix: Honeywell Engines, Systems & Services, 2004 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/AR04-40P4.pdf>
- [42] Ballistic Resistance of Personal Body Armor: NIJ Standard–0101.04. Revision A. Washington: National Institute of Justice, 2001.

[43] BALISTICKÁ ODOLNOST OSOBNÍCH OCHRANNÝCH PROSTŘEDKŮ PŘI OHROŽENÍ STŘEPINAMI: MODIFIKOVANÁ METODA. Praha: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2018.

12 Seznam obrázků

Obr. 3.1 Podmnožiny systému podstatných veličin [1]	13
Obr. 4.1 Chemická struktura aramidu, meta-aramid, para-aramid [3]	15
Obr. 4.2 Řez strukturou textilií, jednosměrné uspořádání vláken, tkanina [6]	16
Obr. 4.3 Typy vazeb tkanin [8]	17
Obr. 4.4 Twaron Platin PT900 [6]	17
Obr. 4.5 Twaron® UD42 [6]	18
Obr. 4.6 Měkká balistická ochrana jako součást neprůstřelné vesty [6]	19
Obr. 4.7 Příklad konstrukce pancíře [9]	19
Obr. 4.8 Neprůstřelná přilba [6]	19
Obr. 4.9 Struktura 0.3" APM2 projektilu [17]	20
Obr. 4.10 Dlouhá penetrační tyč [17]	21
Obr. 4.11 penetrace, P – hloubka penetrace [18]	22
Obr. 4.12 Penetrace (vlevo), perforace (vpravo)	22
Obr. 4.13 Porušení [17,18]	24
Obr. 4.14 Řez laminátu na bázi tkaniny po balistickém impaktu [17]	25
Obr. 5.1 Metody modelování tkanin [27]	33
Obr. 5.2 MICRO metoda [23]	33
Obr. 5.3 MESO model tvořený objemovými (vlevo), skořepinovými elementy (vpravo) [35]	34
Obr. 5.4 MACRO model tkaniny [26]	34
Obr. 5.5 MESO a MESO-heterogenní model tkaniny, různé varianty [21]	35
Obr. 5.6 kombinace metody MICRO a MESO [23]	36
Obr. 5.7 schéma experimentu, projektil [25]	36
Obr. 5.8 Srovnání MACRO a MESO modelu [25]	37
Obr. 5.9 Řez MACRO a MESO modelem [25]	37
Obr. 5.10 Srovnání MACRO a MESO-heterogenního modelu [25]	38
Obr. 5.11 Srovnání experimentu, MACRO a MESO-heterogenního modelu; čelní strana [25]	38
Obr. 5.12 Srovnání experimentu, MACRO a MESO-heterogenního modelu; zadní strana [25]	39
Obr. 6.1 Bilineární elasto-plastické chování s kinematickým a izotropním zpevněním [30]	41
Obr. 6.2 Chování modelu MAT_054 při jednoosém tahovém zatížení	43
Obr. 6.3 křivka $\sigma - \epsilon$ (vlevo), $\tau - \gamma$ (vpravo) pro *MAT_DRY_FABRIC [30]	43
Obr. 6.4 Znárodnění flexibilního chování a fáze uzamčení [30]	44
Obr. 6.5 Integroční body, redukováná (vlevo), plná integrace elementu (vpravo) [31]	46

Obr. 6.6 Znázornění hourglass módu u objemových prvků [28]	46
Obr. 6.7 Shear locking [32]	47
Obr. 7.1 Tahová zkouška tkaniny, nezatížený stav (vlevo), tkanina na konci zkoušky (vpravo)	48
Obr. 7.2 Schéma zkoušky protlačení kulovým trnem	49
Obr. 7.3 aparatura pro zkoušku protlačení trnem	50
Obr. 7.4 upevňující aparatura a tkanina po protržení	50
Obr. 7.5 schéma střelecké zkoušky, měření hloubky vtisku h	51
Obr. 7.6 střelecká zkouška	51
Obr. 8.1 Síť a základní rozměry	53
Obr. 8.2 okrajové podmínky	54
Obr. 8.3 Průběh kontaktní síly v závislosti na posuvu trnu	55
Obr. 8.4 První hlavní napětí při posuvu trnu $u = 7$ mm	55
Obr. 8.5 První hlavní napětí před a po přetržení vláken	56
Obr. 8.6 Protržení tkaniny	56
Obr. 8.7 Lokální souřadnicový systém elementů	58
Obr. 8.8 Síť a okrajové podmínky	59
Obr. 8.9 Síť a okrajové podmínky	60
Obr. 8.10 Síť a okrajové podmínky	61
Obr. 8.11 Detailní pohled na síť	62
Obr. 8.12 Závislost síly na posuvu trnu	64
Obr. 8.13 Model tkaniny po protržení	64
Obr. 8.14 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny	65
Obr. 8.15 Simulace střelby, $vs = 400$ m/s	66
Obr. 8.16 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny	66
Obr. 8.17 Závislost síly na posuvu trnu	67
Obr. 8.18 Model tkaniny po protržení	68
Obr. 8.19 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny	68
Obr. 8.20 Simulace střelby, $vs = 400$ m/s	69
Obr. 8.21 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny	69
Obr. 8.22 Závislost síly na posuvu trnu	71
Obr. 8.23 Model tkaniny po protržení	71
Obr. 8.24 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny	72
Obr. 8.25 Simulace střelby, $vs = 400$ m/s	72
Obr. 8.26 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny	73
Obr. 8.27 Závislost síly na posuvu trnu	74
Obr. 8.28 Model tkaniny po protržení	74
Obr. 8.29 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny	75
Obr. 8.30 Simulace střelby, $vs = 400$ m/s	76
Obr. 8.31 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny	76

Obr. 8.32 Závislost síly na posuvu trnu	77
Obr. 8.33 Model tkaniny po protržení	78
Obr. 8.34 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny	78
Obr. 8.35 Simulace střelby, $vs = 400 \text{ m/s}$	79
Obr. 8.36 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny	79
Obr. 8.37 Závislost síly na posuvu trnu	80
Obr. 8.38 Model tkaniny po protržení	80
Obr. 8.39 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny	81
Obr. 8.40 Simulace střelby, $vs = 400 \text{ m/s}$	82
Obr. 8.41 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny	82
Obr. 8.42 Závislost síly na posuvu trnu	84
Obr. 8.43 Model tkaniny po protržení	85
Obr. 8.44 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny	85
Obr. 8.45 Simulace střelby, $vs = 400 \text{ m/s}$	86
Obr. 8.46 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny	87
Obr. 8.47 Závislost síly na posuvu trnu	88
Obr. 8.48 Model tkaniny po protržení	88
Obr. 8.49 Simulace střelby pro jednu vrstvu tkaniny	89
Obr. 8.50 Simulace střelby, $vs = 400 \text{ m/s}$	89
Obr. 8.51 Simulace střelby pro deset vrstev tkaniny	90
Obr. 8.52 Srovnání balistické odolnosti	93
Obr. 9.1 MKP model střelby do plastelíny	95
Obr. 9.2 Model projektilu ráže 0.44 Magnum SJHP	95
Obr. 9.3 Detail MKP modelu střelby do plastelíny	95
Obr. 9.4 Interakce projektilu a tkaniny	96
Obr. 9.5 Interakce projektilu a tkaniny	97
Obr. 9.6 Porušení tkaniny	97
Obr. 9.7 Hloubka vtisku v plastelíně ($t=1,4 \text{ ms}$)	98
Obr. 9.8 Průběh hloubky vtisku v plastelíně	98
Obr. 9.9 Model sítě: keramika, ocel	100
Obr. 9.10 Model sítě projektilu a terče + okrajové podmínky	100
Obr. 9.11 Model sítě tkaniny, kompletní model + okrajové podmínky	100
Obr. 9.12 Interakce střepiny a terče (bez aramidu), vznik fragmentů	101
Obr. 9.13 rychlost střepiny a fragmentů	101
Obr. 9.14 Interakce střepiny a terče s aramidem, vznik fragmentů	102
Obr. 9.15 rychlost střepiny a fragmentů	102
Obr. 9.16 Posuv zadní vrstvy aramidu v čase $t = 0,46 \text{ ms}$	103
Obr. 9.17 Posunutí zadní vrstvy aramidu (kritická místa)	103

13 Seznam tabulek

Tabulka 4.4.1 Srovnání mechanických vlastností vybraných materiálů [5]	16
Tabulka 7.1 Mechanické vlastnosti aramidové tkaniny	48
Tabulka 7.2 Výsledky protlačovací zkoušky	49
Tabulka 7.3 Výsledky střelecké zkoušky	51
Tabulka 8.1 Materiálové parametry pro MESO model	53
Tabulka 8.2 Materiálové parametry	63
Tabulka 8.3 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	64
Tabulka 8.4 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	65
Tabulka 8.5 Materiálové parametry	67
Tabulka 8.6 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	68
Tabulka 8.7 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	69
Tabulka 8.8 Materiálové parametry	70
Tabulka 8.9 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	71
Tabulka 8.10 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	72
Tabulka 8.11 Materiálové parametry	73
Tabulka 8.12 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	74
Tabulka 8.13 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	75
Tabulka 8.14 Materiálové parametry	77
Tabulka 8.15 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	78
Tabulka 8.16 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	79
Tabulka 8.17 Materiálové parametry	80
Tabulka 8.18 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	81
Tabulka 8.19 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	81
Tabulka 8.20 Materiálové parametry	84
Tabulka 8.21 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	85
Tabulka 8.22 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	86
Tabulka 8.23 Materiálové parametry	87
Tabulka 8.24 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	88
Tabulka 8.25 Počáteční <i>vs</i> a residuální <i>vr</i> rychlosti	89
Tabulka 8.26 Srovnání dob výpočtů a časových kroků	91