

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra mechaniky

Magisterský studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

**STRUKTURNÍ A MATERIÁLOVÁ ANALÝZA
KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ**

**STRUCTURAL AND MATERIAL ANALYSIS
OF CERAMIC MATERIALS**

Diplomová práce

Soňa Urbanová
ZS 2012

Vedoucí práce: Prof. Ing. Michal Šejnoha, Ph.D., DSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

studijní program: Stavební inženýrství
studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby
akademický rok: 2012/2013

Jméno a příjmení diplomanta: Soňa Urbanová

Zadávací katedra: Katedra mechaniky

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Michal Šejnoha, Ph.D., DSc.

Název diplomové práce: Strukturní a materiálová analýza keramických materiálů

Název diplomové práce
v anglickém jazyce: Structural and material analysis of ceramic materials

Rámcový obsah diplomové práce: Obrazová analýza a geometrický popis struktury keramických kompozitů s plátňovou výztuží, homogenizace, modelování mechanických vlastností keramických kazet

Datum zadání diplomové práce: 27.9.2012 Termín odevzdání: 21.12.2012
(vyplňte poslední den výuky přísl. semestru)

Diplomovou práci lze zapsat, kromě oboru A, v letním i zimním semestru.

Pokud student neodevzdal diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat diplomovou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu diplomovou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č.111/1998 (SZŘ ČVUT čl 21, odst. 4).

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

vedoucí diplomové práce

vedoucí katedry

Zadání diplomové práce převzal dne: 27.9.2012

diplomant

Formulář nutno vyhotovit ve 3 výtiscích – 1x katedra, 1x diplomant, 1x studijní odd. (zašle katedra)

Nejpozději do konce 2. týdne výuky v semestru odešle katedra 1 kopii zadání DP na studijní oddělení a provede zápis údajů týkajících se DP do databáze KOS.

DP zadává katedra nejpozději 1. týden semestru, v němž má student DP zapsanou.

(Směrnice děkana pro realizaci stud. programů a SZZ na FSv ČVUT čl. 5, odst. 7)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. M. Šejnohovi, Ph.D., DSc. za odborné vedení, konzultace, připomínky a trpělivost při zpracovávání této práce.

Dále děkuji doc. Ing. J. Zemanovi, Ph.D. za poskytnutí softwaru pro získání geometrických parametrů optimálních buněk analyzovaných materiálů a doc. Ing. J. Němečkovi, Ph.D. za jeho věnovaný čas.

Velké poděkování také patří doc. Ing. V. Šmilauerovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracovávání prvního oddílu předložené diplomové práce.

Také děkuji za finanční podporu GAČR grant č. P105/11/0224.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Strukturní a materiálová analýza keramických materiálů vypracovala samostatně a použila jsem podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 19. 12. 2012

.....

Soňa Urbanová

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o strukturní a materiálové analýze dvou typů keramických materiálů. Prvním typem analyzovaných materiálů jsou H-kazety vyrobené z homogenního keramického materiálu. Jsou zde porovnávány dva různé tvary H-kazet z hlediska jejich odezvy na vybrané zatěžovací stavy. Dalším typem analyzovaných materiálů jsou kompozitní systémy s keramickou maticí a textilní výztuží s plátňovou vazbou, u kterých je pozornost věnována návrhu idealizovaného geometrického modelu na základě statisticky ekvivalentní periodické jednotkové buňky a ověření použitých homogenizačních postupů použitých pro stanovení efektivních elastických vlastností, které byly řešeny metodou Mori-Tanaka a metodou konečných prvků. Výsledky byly poté porovnány s experimentálním měřením. Dále jsou zde, v části týkající se kompozitních systémů, shrnuty základní znalosti o kompozitech a o jednotlivých složkách analyzovaných kompozitů.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Keramika, H-kazeta, kompozit, textilní výztuž, SEPUC, homogenizace, metoda Mori-Tanaka, metoda konečných prvků

ABSTRACT

This master thesis deals with the structural and material analysis of two types of ceramic materials. The first type of the materials are H-cassettes made of a homogeneous ceramic material. There are two different shapes of these H cassettes compared in terms of their response to the selected load cases. The other type of the analyzed materials are composite systems with plain weave textile reinforcement, where attention is paid to the design of an idealized geometric model based on a statistically equivalent periodic unit cell and the verification of homogenization procedures used for the determination of effective elastic properties, which were solved by the Mori-Tanaka scheme and the finite element method. The results were then compared with experimental measurements. This part of the master thesis summarizes also basic information about composites and individual components of analyzed composites.

KEY WORDS:

Ceramic, H-cassette, composite, textile reinforcement, SEPUC, homogenization, Mori-Tanaka scheme, finite element method

OBSAH

PŘEDMLUVA	8
------------------------	----------

I. H-KAZETY

1. ÚVOD.....	11
2. GEOMETRIE A SÍŤ KAZET	13
2.1. Geometrie	13
2.2. Tvorba sítě	15
3. NUMERICKÁ ANALÝZA.....	17
3.1. Materiálový model poškození	18
3.2. Materiálové parametry	18
3.3. Zatížení smykem	20
3.4. Zatížení kroucením.....	26
3.5. Zatížení teplotním šokem.....	29
4. ZÁVĚR.....	33

**II. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY
S KERAMICKOU MATRICÍ**

1. ÚVOD	35
2. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	37
2.1. Kompozitní materiály v praxi.....	39
2.2. Matrice	40
2.2.1. Keramická matrice	40
2.2.2. Lukosil	41
2.3. Kompozity s keramickou matricí	43
2.4. Výztuž.....	43
2.4.1. Částicové kompozity	43
2.4.2. Vláknové kompozity	44
2.4.3. Plátňová vazba.....	45
2.4.4. Skleněná vlákna.....	45
2.4.5. Čedičová vlákna	46
2.4.6. Uhlíková vlákna.....	48
2.5. Struktura kompozitu.....	49

3. EXPERIMENT	51
3.1. Výroba kompozitů.....	51
3.2. Snímání příčných řezů	51
3.3. Laboratorní měření.....	52
3.3.1. Polymerní matrice	53
4. VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET	55
4.1. Stanovení geometrie.....	55
4.1.1. Optimalizace buněk.....	55
4.2. Stanovení objemového zastoupení jednotlivých fází	57
4.3. Měření materiálových parametrů	59
4.3.1. Nanoindentace	59
4.3.1.1. Vlastní měření	60
5. VÝPOČET EFEKTIVNÍCH ELASTICKÝCH VLASTNOSTÍ	64
5.1. Stanovení efektivních vlastností metodou Mori-tanaka	64
5.1.1. Průměrování.....	64
5.1.2. Vyjádření efektivní matice tuhosti.....	65
5.1.3. Koncentrační faktor	66
5.1.4. Eshelbyho tenzor	67
5.1.5. Metoda Mori.-Tanaka	69
5.1.6. Výsledky	70
5.2. Stanovení efektivních elastických vlastností metodou konečných prvků	72
5.2.1. Metoda konečných prvků.....	72
5.2.2. Výsledné efektivní elastické vlastnosti.....	73
5.3. Porovnání výsledků.....	75
6. ZÁVĚR	77

PŘEDMLUVA

Prezentovaná diplomová práce je rozdělena do dvou zcela samostatných oddílů, které se zabývají materiálovou a strukturní analýzou dvou typů keramických materiálů. Každý z těchto oddílů obsahuje úvod i závěr týkající se vlastního tématu.

Tématem prvního oddílu je analýza keramických H-kazet, které jsou vyrobeny z homogenního keramického materiálu. V úvodu je stručné seznámení s těmito typy žáruvzdorných tvarovek, uvedení do řešeného problému a vymezení cílů. Druhá kapitola obsahuje informace o geometrii dvou typů analyzovaných H-kazet, tvorbě výpočetního modelu a tvorbě sítě pro následující numerickou analýzu provedenou v kapitole třetí. Na začátku této kapitoly jsou uvedeny aplikované zatěžovací stavy se zdůvodněním jejich výběru. Poté je uveden použitý materiálový model poškození. Dále tato kapitola pokračuje materiálovými parametry materiálu Silikor CM, z něhož jsou H-kazety vyrobeny a mezi nimiž se nacházejí i vstupní data do samotného výpočtu. Kapitoly 3.3. až 3.5. jsou již věnovány jednotlivým zvoleným zatěžovacím stavům. Kromě vykreslené odezvy na daný zatěžovací stav jsou vždy na konci každé z těchto kapitol dosažené výsledky analyzovaných kazet, z hlediska jejich vzájemného porovnání, zhodnoceny. Následující čtvrtá kapitola již uzavírá celý I. oddíl.

Další - II. oddíl se zaměřuje na kompozitní systémy s keramickou maticí a textilní výztuží s plátňovou vazbou, kde materiál výztuže tvoří čedičová, skleněná a uhlíková vlákna. Členění je provedeno následovně. V první kapitole je, stejně tak jako v oddílu I., stručné uvedení do daného tématu a soupis cílů. Kapitola druhá se věnuje kompozitům v širším slova smyslu, záměrem je vytvořit čtenářům širší představu o kompozitech a pojmech s nimi souvisejícími. Po všeobecném popsání kompozitů se tato kapitola dále zabývá konkrétní maticí a výztužemi, které byly použity k výrobě kompozitů pro experiment popsáný v kapitole třetí, kde je stručně popsána výroba kompozitů, snímání příčných řezů a samotné laboratorní měření, jednak provedené již na zhotovených keramických vzorcích analyzovaných kompozitů, dále na kompozitech s maticí polymerní. Čtvrtá kapitola se zabývá získáním vstupních dat do výpočtu efektivních elastických vlastností, konkrétně jsou zde shrnuty výsledky optimalizací buněk pro stanovení geometrie SEPUC, objemového zastoupení jednotlivých fází a v neposlední řadě i výsledky Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla matrice a uhlíkových a čedičových vláken získané nanoindentací. Na kompozitech se skleněnou výztuží měření provedeno nebylo. Stanovení parametrů skleněných vláken vstupujících do výpočtu efektivních elastických vlastností, který je obsahem následující kapitoly, je popsáno dále v kapitole 4. Výpočet v páté kapitole probíhá

nejprve metodou Mori-Tanaka, následně metodou konečných prvků. Na konci této kapitoly jsou porovnány výsledky získané oběma metodami s experimentálním měřením. Následující - šestá kapitola uzavírá II. oddíl, je tedy poslední kapitolou předložené práce.

I. H-KAZETY

1. ÚVOD

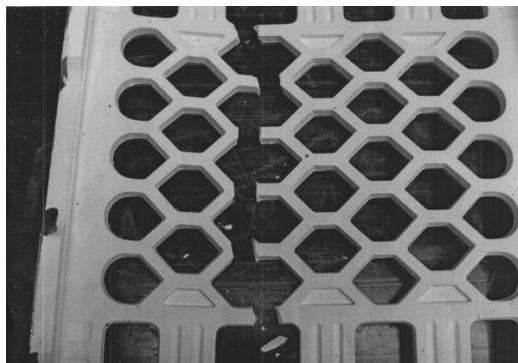
Tato část diplomové práce je věnována H-kazetám vyrobeným z žáruvzdorné keramiky, které slouží zejména jako nosiče vypalovaných střešních tašek. Žáruvzdorné tvarovky, kam tyto kazety patří, fungují na trhu již dlouhou dobu a je snaha je stále zdokonalovat. S dlouhodobým problémem destrukce H-kazet po několika cyklech zatěžování oslovila katedru mechaniky FSv ČVUT v Praze společnost Silike keramika, spol. s r.o. (dále jen Silike). Aby tyto kazety byly nadále konkurenceschopné, je žádoucí pracovat na jejich vývoji tak, aby snášely vyšší zatížení a zároveň se zvýšila odolnost proti únavě a minimalizovala jejich hmotnost.

Silike je výrobcem žáruvzdorných tvarovek technologií lisování z polosuché hmoty (drolenky) a lití keramické břčky. Ročně vyrobí až 10 000 tun žáruvzdorných tvarovek. Více než 96% produkce je určeno pro vývoz z České Republiky.

Výroba žáruvzdorných tvarovek má v Děčíně více než stoletou tradici. Závod byl postaven již v roce 1889 jako závod Bodenbach koncernu DIDIER a do roku 1970 vyráběl plastickou technologií ročně až 35 000 tun šamotu určeného zejména pro plynárenství a koksárenství. V následujících letech přešel závod postupnou modernizací na technologii lisování z polosuchých hmot na bázi mullitických, kordieritových a andaluzitových ostřiv. Možnosti výroby byly v roce 2010 rozšířeny ještě o technologii lití.

Žáruvzdorné tvarovky, které firma Silike produkuje, lze rozdělit do několika skupin. Řešené kazety patří do skupiny pálicích pomůcek Silikor na bázi mullitu a kordieritu, dále do H-kazet. Pálicí pomůcky Silikor jsou vyráběny technologií lisování z polosuché hmoty na hydraulických lisech nebo litím keramické břčky do sádrových forem. Takto vyrobený materiál je označen jako Silikor CM.

Pomůcky Silikor slouží zejména jako nosiče vypalovaných střešních tašek. H-kazety vyrábí firma Silike litím keramické břčky do sádrových forem. Jedná se o takzvané monokazety, na kterých se pálí střešní tašky v horizontální poloze [1].



Obr. 1.1 Porušení H-kazety, obr. dodaný Silike

Počet cyklů zatěžování, po kterých dojde k destrukci, se v případě firmy Silike mění v závislosti na tvaru kazety, materiál v současnosti není vyvíjen. Výroba každého nově navrženého tvaru je podmíněna také výrobou sádrové formy. Experimentální zjištění nově navrženého tvaru je tedy drahé, a proto vhodnější cestou vývoje je počítačové modelování.



Obr. 1.2 Forma na výrobu H-kazet

Obsahem tohoto oddílu je vytvoření 3D geometrie a sítě modelu dvou tvarově odlišných H-kazet, referenční kazety a kazety Silike, a zjištění jejich odezvy na smyk, kroucení, zatížení teplotou a následně vyhodnocení výsledků ve smyslu porovnání těchto dvou kazet, což je také cílem tohoto - I. oddílu předložené diplomové práce.

2. GEOMETRIE A SÍŤ KAZET

2.1. Geometrie

K vytvoření výpočetního modelu kazet byl použit software Salome [2]. Tento software poskytuje možnost zpracování geometrie pro numerické simulace. Může být použit jako samostatná aplikace pro generování modelů CAD, jejich přípravu pro numerické výpočty a zpracování výsledků výpočtů.

Základní rozměry všech H-kazet se shodují. Jejich geometrie si také odpovídá ve tvarech boků a obvodových výřezech. Základní rozměry jsou:

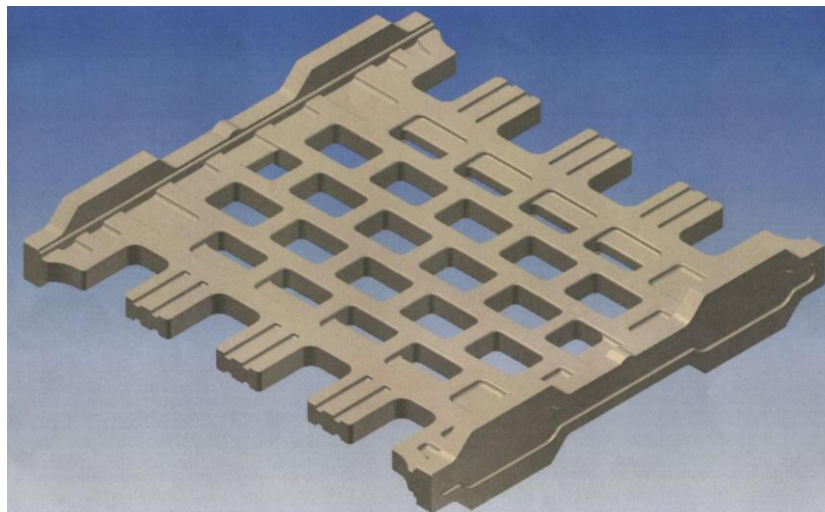
- rozměry opsaného kvádrů: 434x420x72 mm
- tloušťka střední části bez výřezů: 19 mm
- tloušťka střední části redukováná částečnými výřezy: 10 mm

Geometrie se liší pouze ve vnitřních výřezech. Jejich tvary a uspořádání jsou předmětem zkoumání.

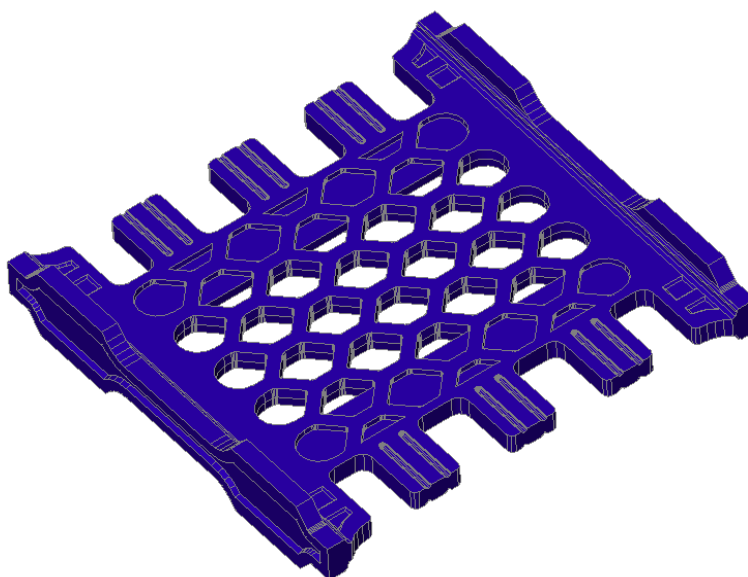
Ačkoli lze tuto úlohu nepochybně zjednodušit na úlohu rovinnou s dostatečným zachováním přesnosti, po dohodě s firmou Silike bylo přistoupeno k modelování kazet ve 3D, zejména z důvodu názornějšího předvedení výsledků.

V softwaru Salome jsou všechna tělesa modelována prvky "solid". Model kazet se skládá ze tří samostatných částí - dvou boků a středu, které jsou následně spojeny v jedno těleso. Ve vytvořené síti pak neexistuje jediný element, který by svým objemem zasahoval jak do části středové, tak do boků. Z vytvořené sítě pak lze snadno vybrat všechny prvky patřící jednotlivým částem. Toho je dále využito pro zadávání materiálových parametrů pro výpočet odezvy.

Většina hran byla zaoblena, poloměr zaoblení je 1mm.



Obr. 2.1 Referenční kazeta, obr. dodaný firmou Silike



Obr. 2.2 Kazeta Silike, obr. z dwg, dodáno firmou Silike

Objem kazet je uveden v tabulce 2.1.

Kazeta	Objem [dm ³]
Referenční	2,5
Silike	2,6

Tab. 2.1 Objem materiálu kazet

2.2. Tvorba sítě

S rostoucím počtem prvků sítě dochází ke konvergenci výpočtu k přesnému řešení, ovšem je potřeba brát v úvahu i časovou náročnost výpočtů. Proto se musí najít vhodný kompromis tak, aby dosažené výsledky dostatečně přesně aproximovaly přesné řešení a zároveň časová náročnost výpočtu byla co možná nejnižší.

Síť kazet byla vytvořena také v softwaru Salome, viz 2.1. Tvar jednotlivých elementů byl zvolen jako čtyřstěn.

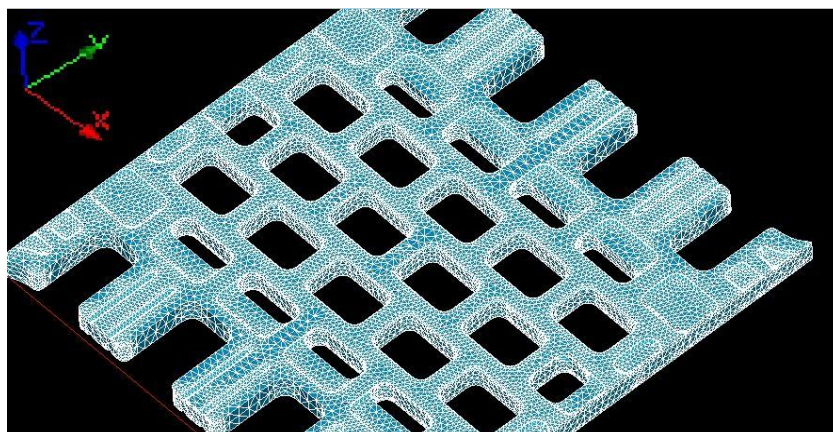
Při vytváření sítě byla snaha minimalizovat počet prvků současně se splněním podmínky zachování geometrie.

Parametry vytvořené sítě jsou shrnuty v tabulce 2.2.

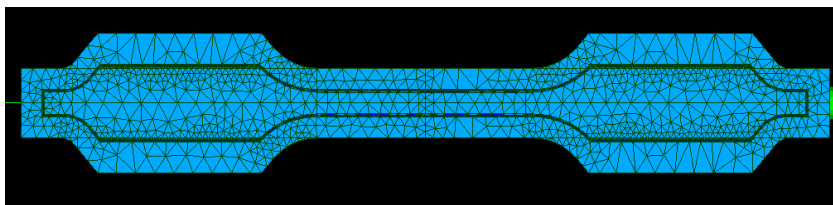
Parametr sítě	Referenční kazeta	Kazeta Silike
min size	0,3 mm	0,3 mm
max size	10 mm	10 mm
počet prvků	150 292	157 354

Tab. 2.2 Parametry sítě

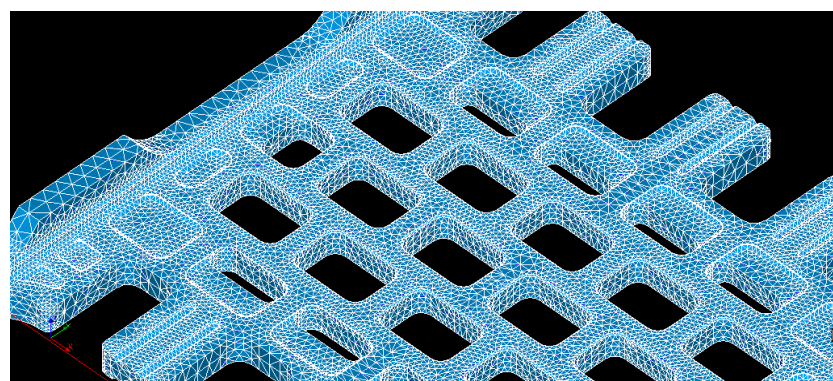
Vzhledem ke složitosti geometrie je i přes hrubě nastavené parametry sítě počet elementů poměrně vysoký, ovšem dalším zhrubováním sítě by již docházelo k velkým nepřesnostem, zejména v zaoblených oblastech a oblastech rohů. Jelikož právě tato místa jsou krizová, je nutné zachovat v těchto oblastech síť jemnější tak, aby vystihovala zadanou geometrii. V opačném případě by došlo k zásadnímu zkreslení výsledků.



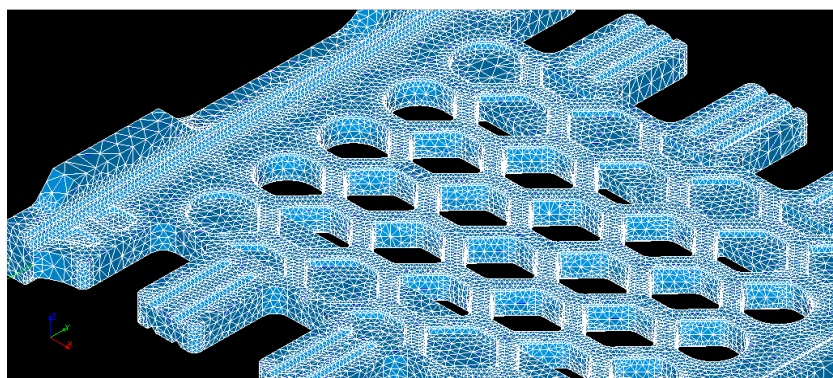
Obr. 2.3 Střed referenční kazety



Obr. 2.4 Bok kazety



Obr. 2.5 Referenční kazeta



Obr. 2.6 Kazeta Silike

3. NUMERICKÁ ANALÝZA

Analýza byla provedena v programu OOFEM [3].

OOFEM je volně šiřitelný program pro řešení multifyzikálních problémů metodou konečných prvků s objektově orientovanou architekturou pro řešení úloh mechaniky pevné fáze, transportních jevů a mechaniky tekutin.

Projekt OOFEM je aktivně vyvíjen od roku 1997 na katedře mechaniky Stavební fakulty ČVUT a je šířen pod GNU licenci.

Vstupní soubory pro program OOFEM byly vygenerovány pomocí konvertoru unv2oofem. Pro jejich vytvoření byl použit formát sítě unv ze Salome a parsovací soubor, který specifikoval přiřazení materiálů, okrajové podmínky a zatížení. Tato výpočetní část probíhala pod dohledem doc. Ing. Víta Šmilauera, Ph.D. z katedry mechaniky FSv, ČVUT v Praze.

Pro stanovení odezvy byly uvažovány následující zatěžovací stavy:

- zatížení smykem
- zatížení kroucením
- zatížení teplotním šokem - řešeno jako sdružená termomechanická úloha

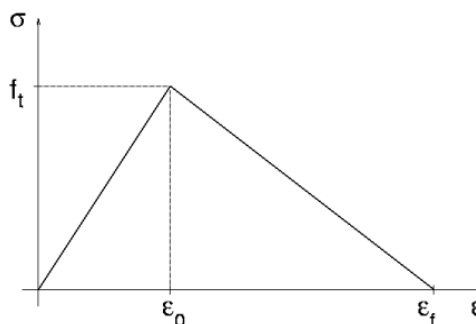
V reálném provozu jsou H-kazety při projíždění pecí vystaveny vysokým teplotám a následnému prudkému ochlazení, což je v případě následující analýzy simulováno zatížením teplotním šokem. Dále jsou vystaveny různým typům mechanického zatěžování. Podmínky reálného zatížení nejsou zcela známé. Pro naši analýzu byly vybrány dva zástupci mechanického zatížení, zatížení smykem a zatížení kroucením, a to z důvodu relativně jednoduchého modelování a znázornění rozdílného chování.

Pro grafické zobrazení výsledků byl zvolen program ParaView [4]. Jedná se o volně přístupný software sloužící k vytvoření vizualizací.

3.1. Materiálový model poškození

V pokročilých stádiích přetvárného procesu vykazuje řada přírodních i umělých materiálů změkčení, což znamená, že při rostoucí deformaci klesá jimi přenášené napětí. Příčinou bývá postupné porušování materiálu, provázené postupným poklesem efektivní plochy schopné přenášet napětí. Zvolený model změkčení výrazně ovlivňuje výsledky analytických výpočtů nebo numerických simulací.

Pro náš případ byl jako materiálový model ke všem výpočtům použit izotropní model poškození s lineárním změkčením, viz obrázek 3.1. Tento model předpokládá, že úbytek tuhosti je izotropní, neboli tuhost odpovídající různým směrům se redukuje úměrně a nezávisle na směru zatěžování. Tensor tuhosti zahrnující poškození je vyjádřen jako $D = (1 - \omega)D_e$, kde ω je proměnná skalární veličina poškození - parametr poškození a D_e je elastický tenzor tuhosti. Parametr poškození se pohybuje v mezích 0 až 1, kde nula znamená neporušený průřez a pro plně rozvinuté trhliny je tento parametr roven jedné.



Obr. 3.1 Pracovní diagram

3.2. Materiálové parametry

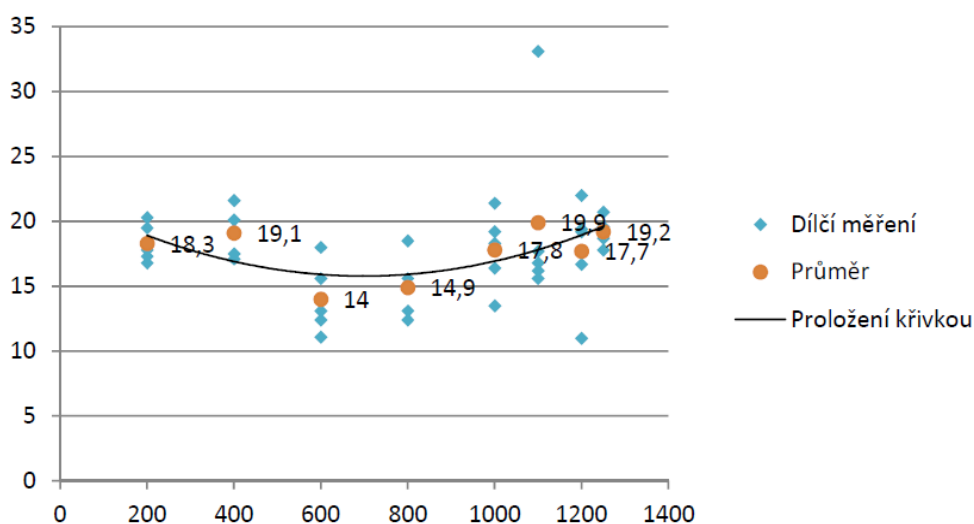
Parametry materiálu byly dodány výrobcem [1].

Pevnost v tahu za ohybu za žáru

Stanovení bylo provedeno podle zkušební postupu ČSN EN 993-7 Zkušební metody pro žáruvzdorné výrobky tvarové hutné - Část 7: Stanovení pevnosti v ohybu za zvýšené teploty. Výsledky zkoušky na materiálu Silikor CM jsou shrnuty v tabulce 3.1 a v grafu na obrázku 3.2.

Číslo stanovení	Pevnost v tahu za ohybu za žáru [MPa]							
	Teplota zkoušky [°C]							
	200	400	600	800	1000	1100	1200	1250
1	20,3	20,1	15,6	18,5	19,2	15,6	22	20,7
2	19,5	19,3	11,1	15	18,3	16,2	19,4	18,7
3	17,8	17,1	13,1	12,4	13,5	16,8	16,7	17,8
4	17,3	17,5	12,4	15,6	16,4	17,7	19,2	19,6
5	16,8	21,6	18	13,1	21,4	33,1	11	19,2
Průměr	18,3	19,1	14	14,9	17,8	19,9	17,7	19,2

Tab. 3.1 Pevnost v tahu za ohybu za žáru



Obr. 3.2 Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na teplotě

Další technická data materiálu Silikor CM

Objemová hmotnost	1,95	g/cm ³
Koeficient teplotní roztažnosti	2,40E-06	K ⁻¹
Odolnost proti náhlým změnám teploty	90	cyklů
Pevnost v ohybu:		
při 20°C	15	N/mm ²
při 1100°C	17	N/mm ²
při 1200°C	14	N/mm ²
Chemické složení:		
Al ₂ O ₃	41	%
MgO	7,5	%
Fe ₂ O ₃	<1,0	%
Tepelná vodivost:		
při 400°C	1,3	W/mK
při 600°C	1,36	W/mK
při 800°C	1,43	W/mK
při 1000°C	1,49	W/mK
při 1200°C	1,57	W/mK

Tab. 3.2 Technická data

Data uvedená v tabulce 3.2 byla stanovena jako průměrné hodnoty testovaných vzorků.

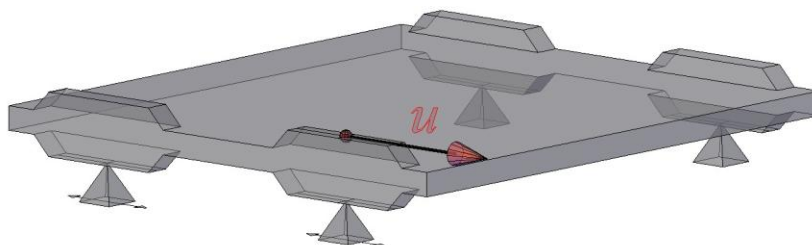
Materiálové vlastnosti H kazet:

- Modul pružnosti $E = 40 \text{ GPa}$
- Poissonovo číslo $\nu = 0,2$
- Relativní deformace při dosažení jednoosé pevnosti v tahu: $\varepsilon_0 = 3,75 \cdot 10^{-4}$
- Lomová energie $g_f = 54 \text{ J} / \text{m}^2$ - odhad

3.3. Zatížení smykem

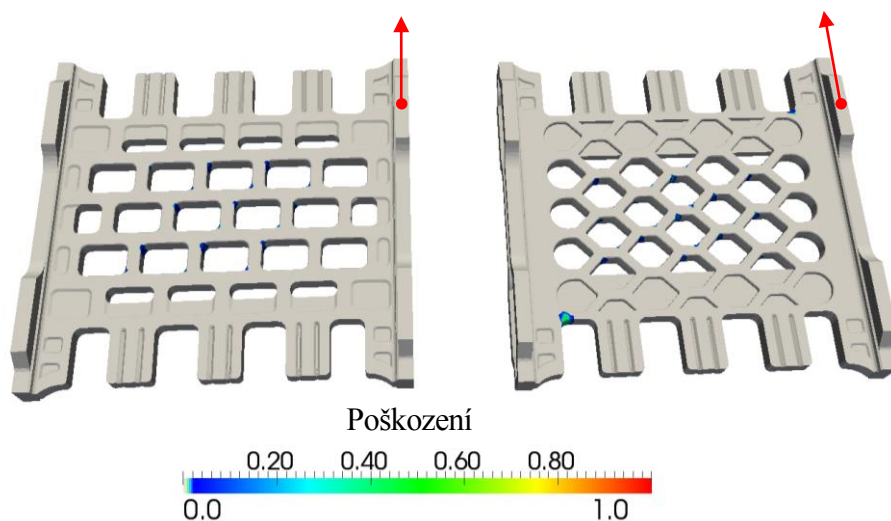
Zatížení smykem bylo simulováno vynuceným posunem bodu kazety na jejím boku ve směru osy Y. Na tomto boku byly předepsány posuvné podpory s umožněným posunem ve směru předepsaného posunu. Protější bok kazety byl podepřen neposuvnými podporami. Zatěžovací schéma je na obrázku 3.3.

Odezva kazety byla popsána parametrem poškození. Tento parametr byl zaznamenán ve 20-ti krocích v závislosti na velikosti posunu zatíženého bodu až do velikosti 1mm. Přírůstky posunu v jednotlivých krocích zatěžování byly zvoleny 0,05 mm.

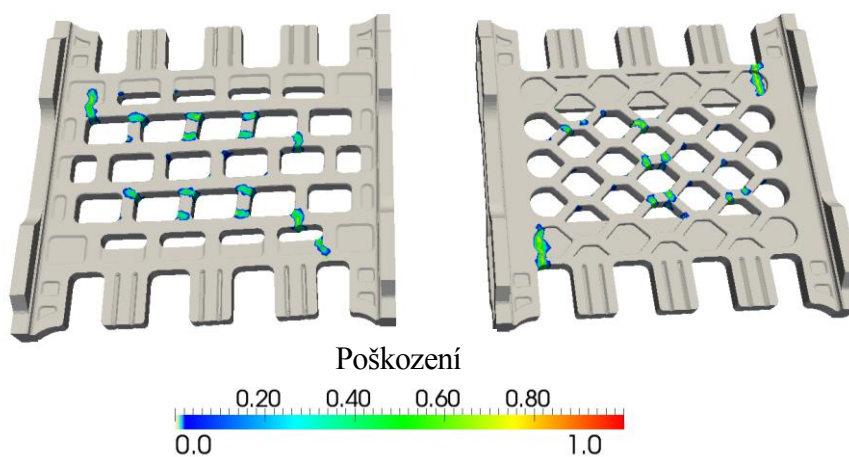


Obr. 3.3 Schéma podepření a zatížení

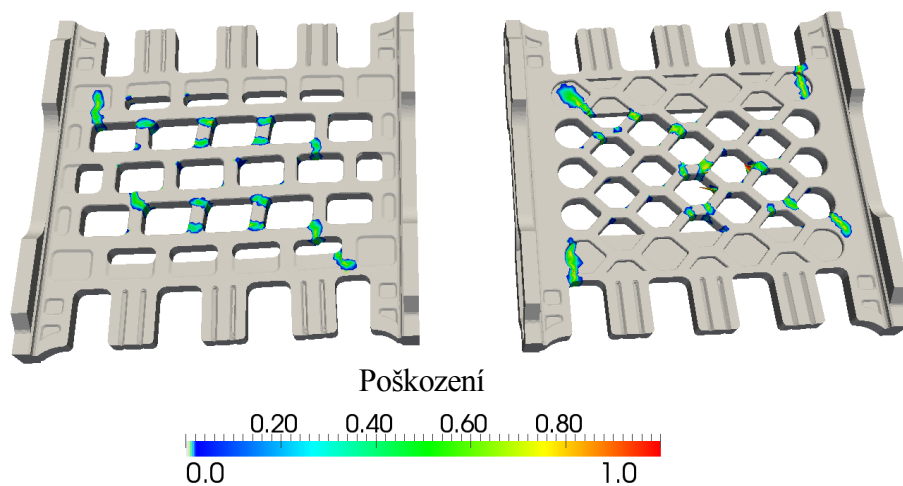
Pro názornost je vykreslená odezva 40x zvětšená.



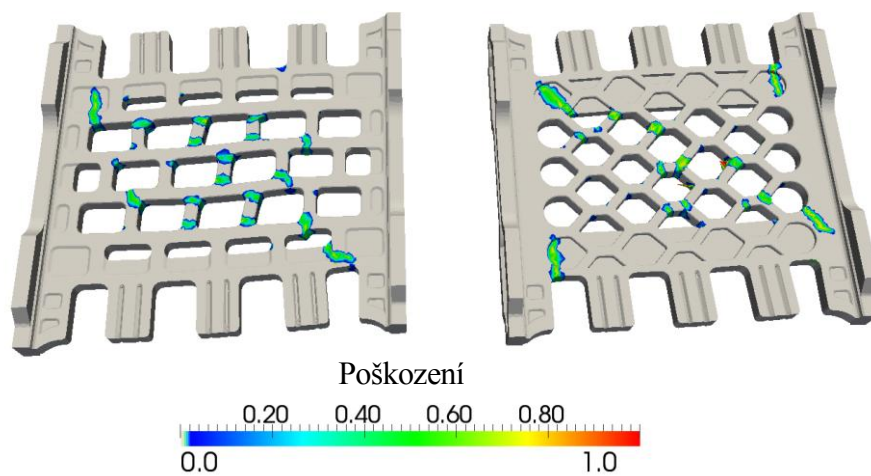
a) Poškození odpovídající posunu $u = 0,15 \text{ mm}$



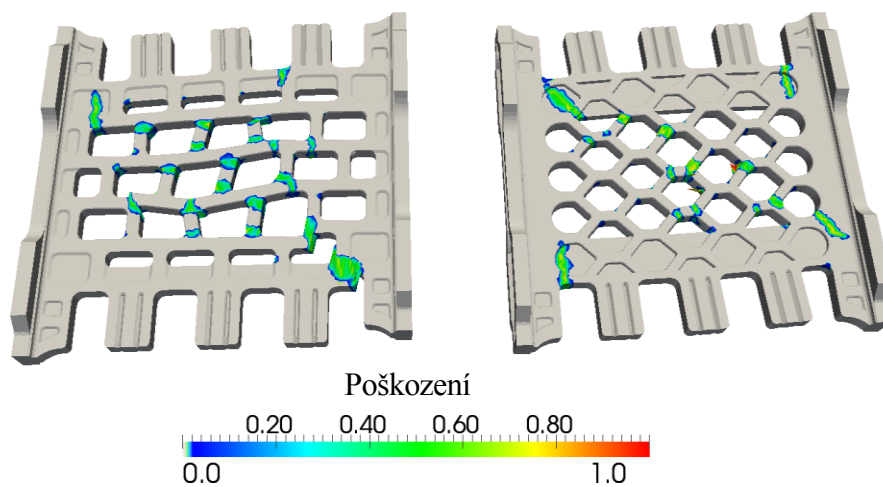
b) Poškození odpovídající posunu $u = 0,25 \text{ mm}$



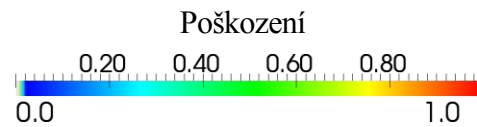
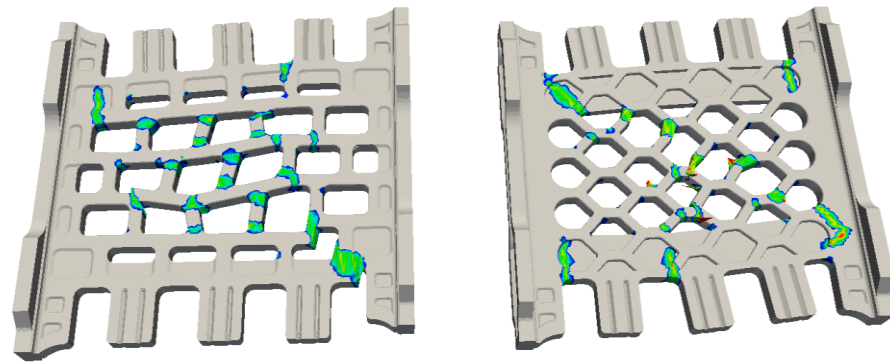
c) Poškození odpovídající posunu $u = 0,3 \text{ mm}$



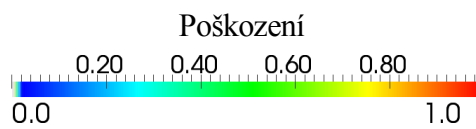
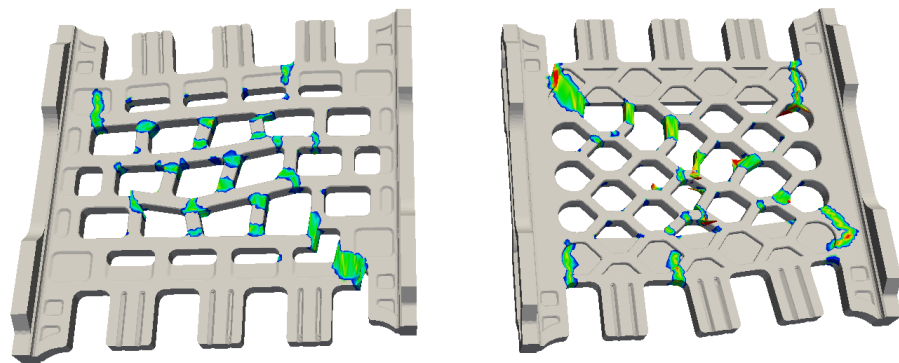
d) Poškození odpovídající posunu $u = 0,45 \text{ mm}$



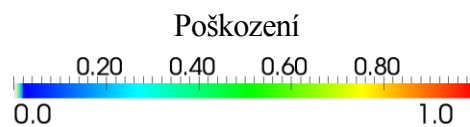
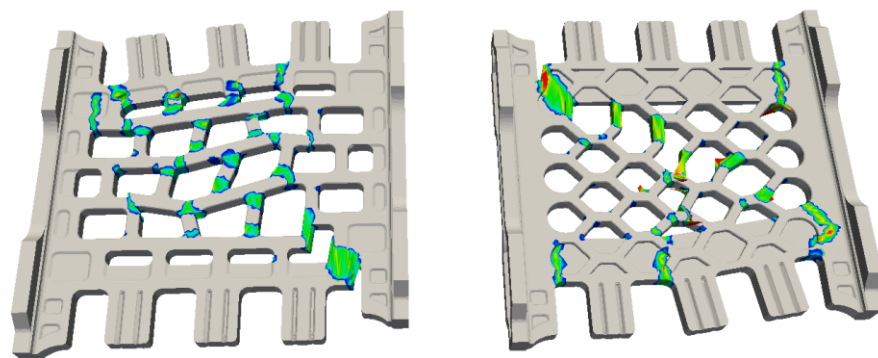
e) Poškození odpovídající posunu $u = 0,5 \text{ mm}$



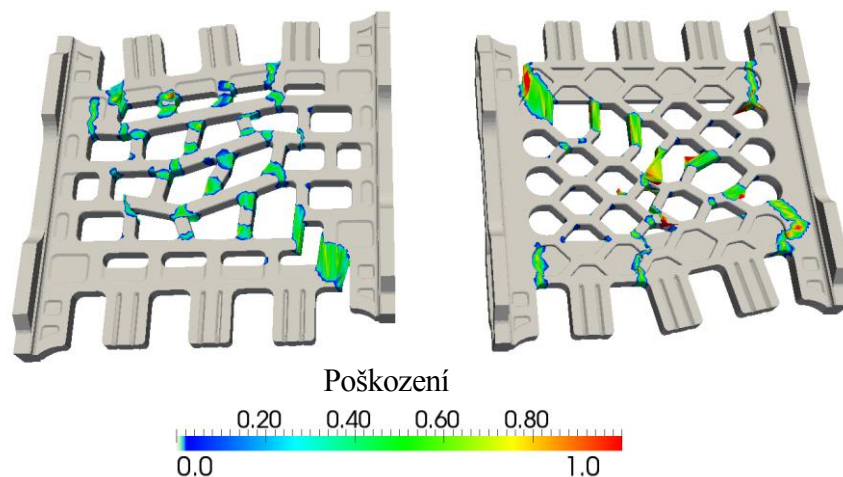
f) Poškození odpovídající posunu $u = 0,6 \text{ mm}$



g) Poškození odpovídající posunu $u = 0,65 \text{ mm}$



h) Poškození odpovídající posunu $u = 0,8 \text{ mm}$

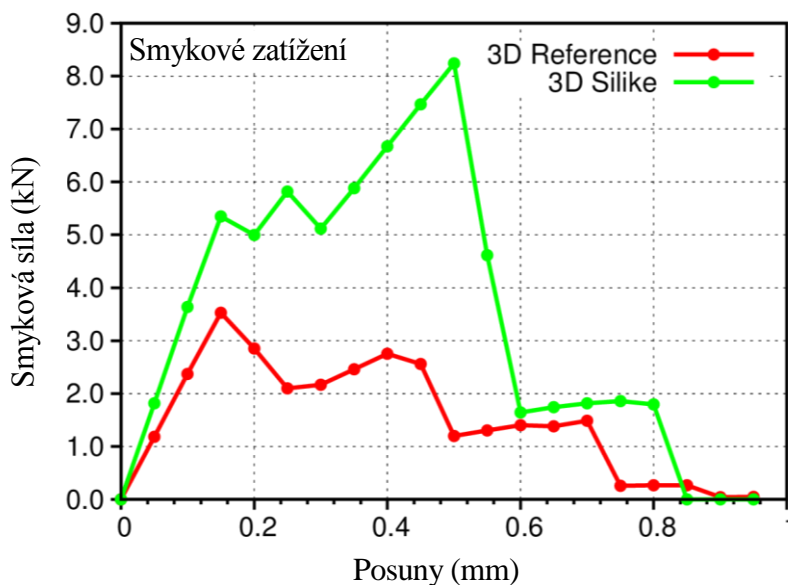


i) Poškození odpovídající posunu $u = 0,95 \text{ mm}$

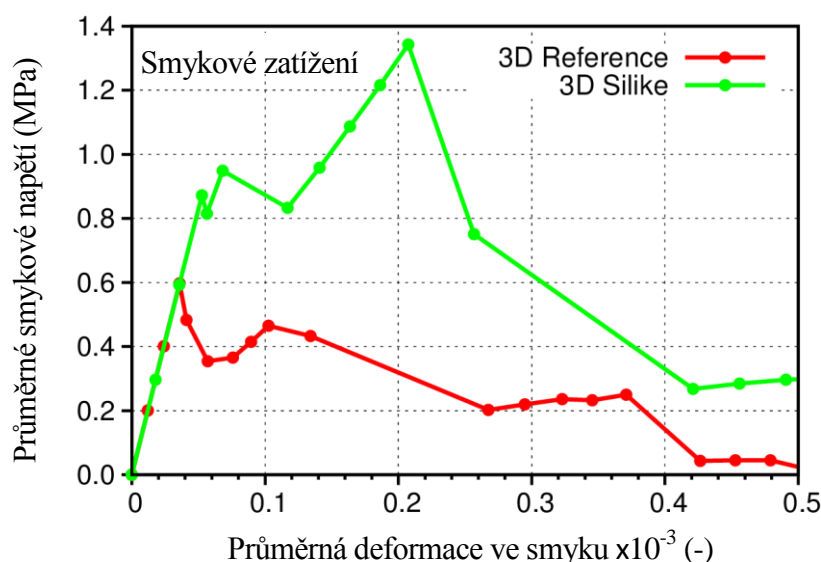
Obr. 3.4 Odezva kazet na zatěžování smykem ve vybraných krocích ve 3D

Na obrázku 3.4 a) je zobrazen 3. zatěžovací krok, ve kterém dochází ke vzniku prvních trhlin u obou analyzovaných kazet. V tomto kroku je velikost vynuceného posunu pravého boku $u = 0,15 \text{ mm}$. V dalších krocích zatěžování se trhliny dále rozvíjejí, k velmi významnému rozvoji defektů dojde u kazety Silike při vynuceném posunu $u = 0,50 \text{ mm}$, u referenční kazety je rozvoj trhlin rozdělen rovnoměrněji. Na obrázku 3.4 c) již lze predikovat mód porušení kazety Silike, u referenční kazety je mód porušení patrnější až na obrázku 3.4 d). Při posunu o velikosti $u = 0,95 \text{ mm}$ jsou již v mnoha průřezech trhliny zcela rozvinuté.

Následující grafy vykreslují závislost síly na velikosti posunu a závislost průměrného napětí na průměrné deformaci.



Obr. 3.5 Závislost síly na velikosti posunu kazet při zatěžování smykem

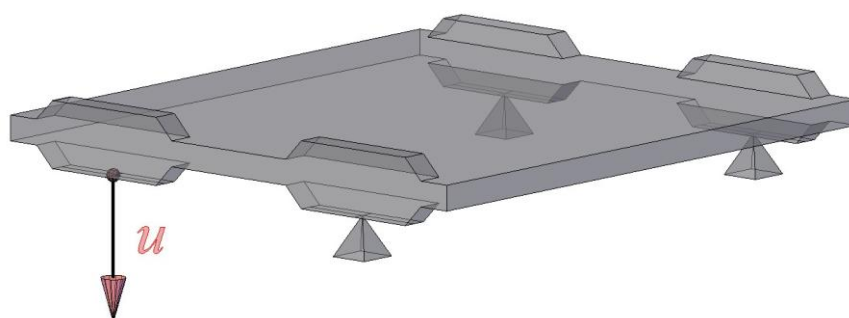


Obr. 3.6 Pracovní diagram kazet při zatěžování smykem

Z vykreslené odezvy lze vyčíst o něco vyšší tuhost kazety Silike oproti Referenční kazetě při tomto typu zatěžování. Ta je částečně způsobena nejen její geometrií, ale i vyšším objemem materiálu. Vlivem vyšší tuhosti dochází při stejném posunu obecně k většímu napětí, které je příčinou dřívějšího rozvoje trhlin. Nejvíce namáhané body leží v konkávních oblastech, kde vznikají singulární body napětí. To platí ve všech zatěžovacích stavech, nejen v případě smykového zatěžování. Kazeta Silike má při zatěžování smykem více než dvakrát vyšší únosnost, což je patrné z grafů na obrázcích 3.5 a 3.6.

3.4. Zatížení kroucením

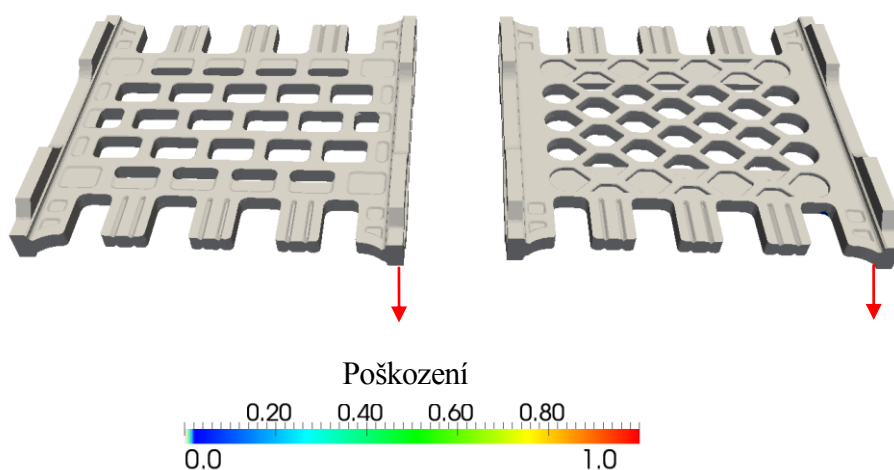
Kroucení H-kazet bylo simulováno vynuceným posunem jednoho bodu kazety vertikálním směrem, tedy ve směru osy Z, další tři body kazety byly pevně podepřeny. Tyto body byly zvoleny uprostřed kontaktních ploch boků kazet při dolním povrchu. Schéma zatížení je na obrázku 3.7.



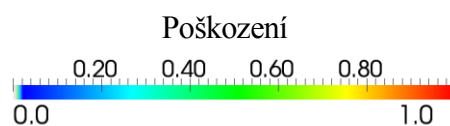
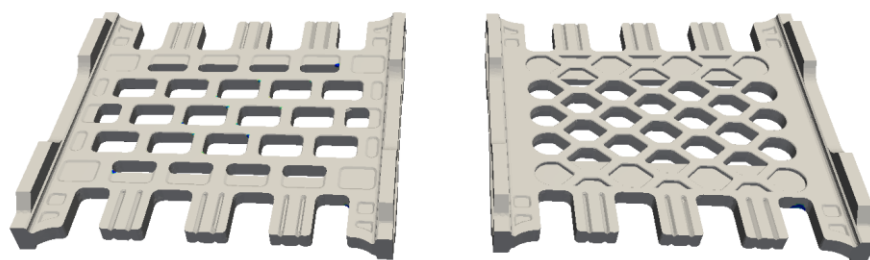
Obr. 3.7 Schéma podepření a zatížení

Odezva kazet byla popsána parametrem poškození ve 20-ti krocích v závislosti na velikosti posunu zatíženého bodu až do velikosti $u = 3,8 \text{ mm}$, přičemž první krok odpovídá nulovému posunu. Přírůstky posunů v jednotlivých krocích zatěžování jsou $\Delta u = 0,2 \text{ mm}$.

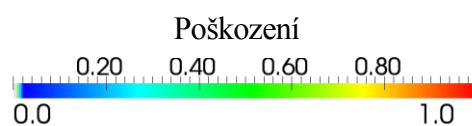
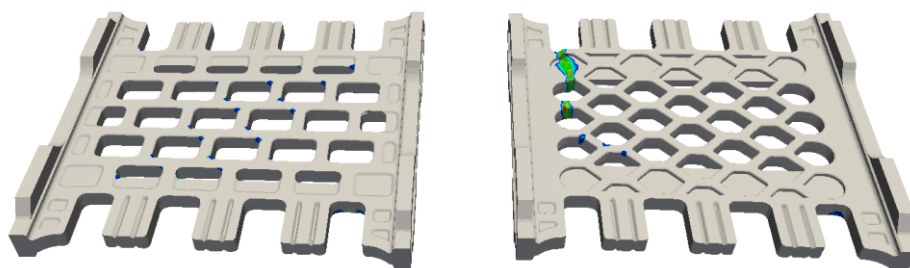
Pro názornost je vykreslená odezva 40x zvětšená.



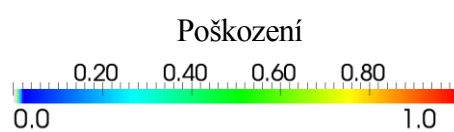
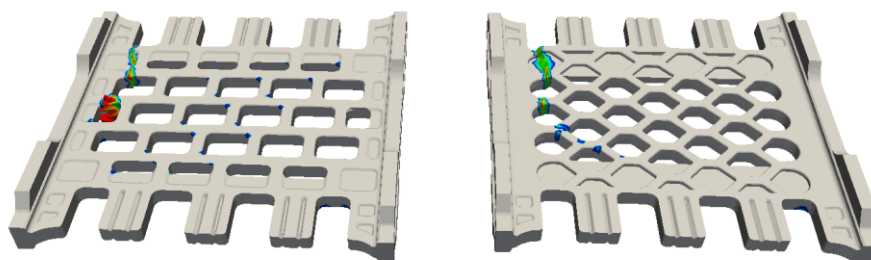
a) Poškození odpovídající posunu $u = 0,8 \text{ mm}$



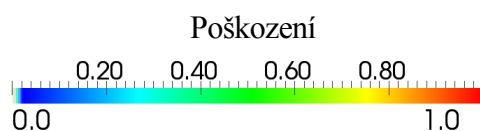
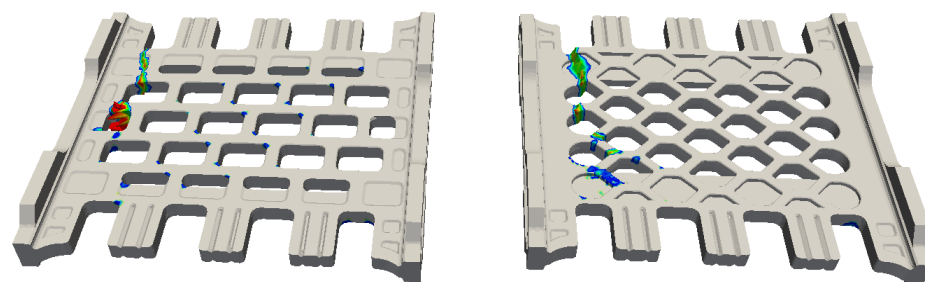
b) Poškození odpovídající posunu $u = 1,0 \text{ mm}$



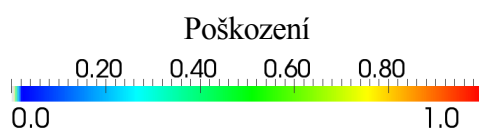
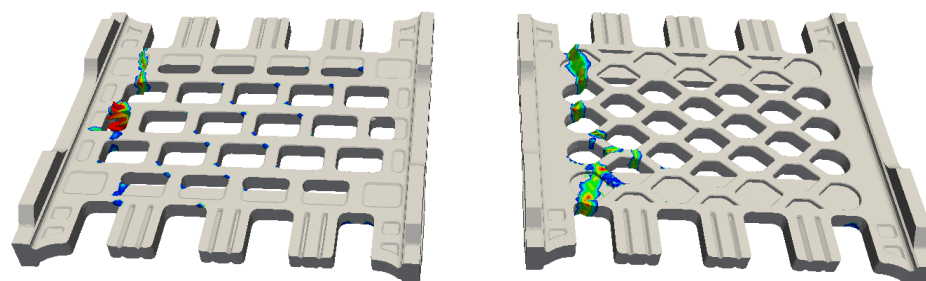
c) Poškození odpovídající posunu $u = 1,2 \text{ mm}$



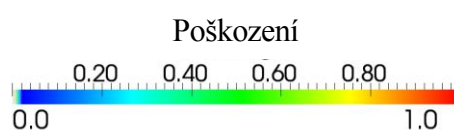
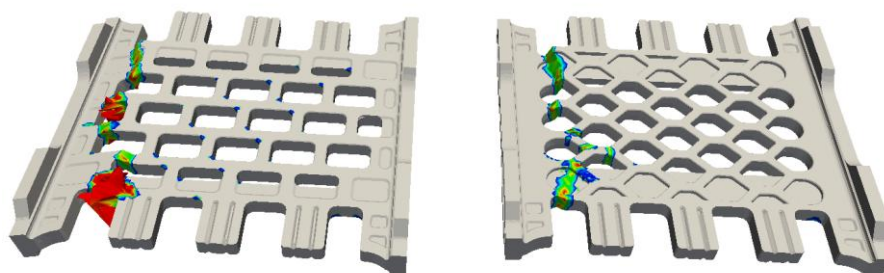
d) Poškození odpovídající posunu $u = 1,4 \text{ mm}$



e) Poškození odpovídající posunu $u = 1,6 \text{ mm}$



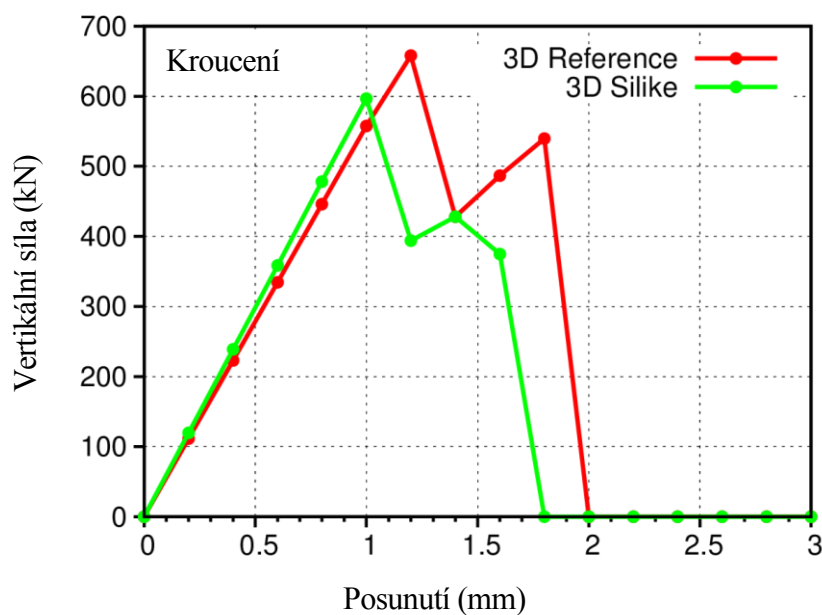
f) Poškození odpovídající posunu $u = 1,8 \text{ mm}$



g) Poškození odpovídající posunu $u = 2,0 \text{ mm}$

Obr. 3.8 Odezva kazet na zatěžování kroucením ve vybraných krocích

Poslední stav před vznikem trhlin při zatěžování kroucením je znázorněn na obrázku 3.8 a) a odpovídá posunu $u = 0,8 \text{ mm}$. Při posunu $u = 1,2 \text{ mm}$ má již kazeta Silike v některých průřezech zcela rozvinuté trhliny, stejně jako referenční kazeta při posunu $u = 1,4 \text{ mm}$, nicméně v této fázi ještě nedochází k jejich úplné destrukci a dále odolávají zatížení. Ke úplné destrukci dochází u kazety Silike při posunu $u = 1,8 \text{ mm}$, u referenční kazety při posunu $u = 2,0 \text{ mm}$.



Obr. 3.9 Síla v závislosti na vertikálním posunutí daného bodu.

Jak je patrné z grafu na obrázku 3.9, chování obou kazet je při zatížení kroucením srovnatelné.

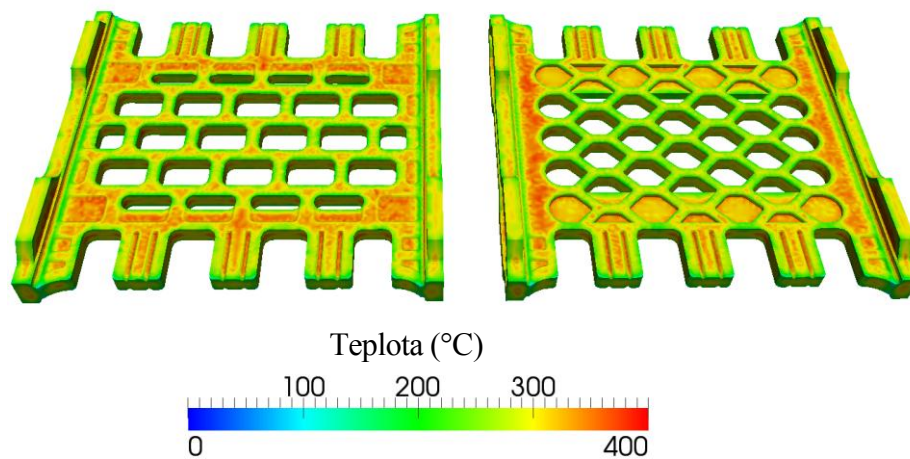
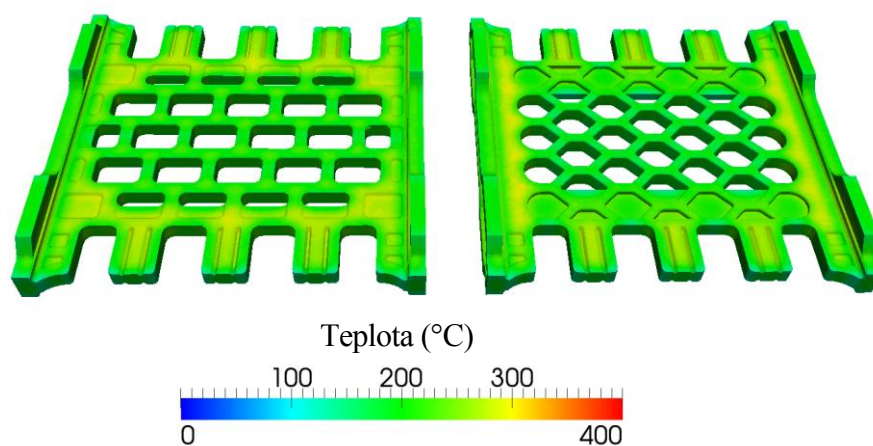
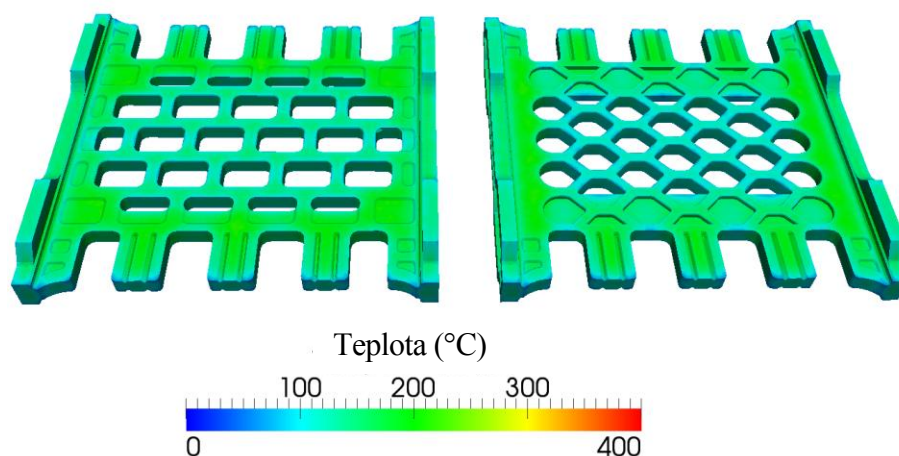
3.5. Zatížení teplotním šokem

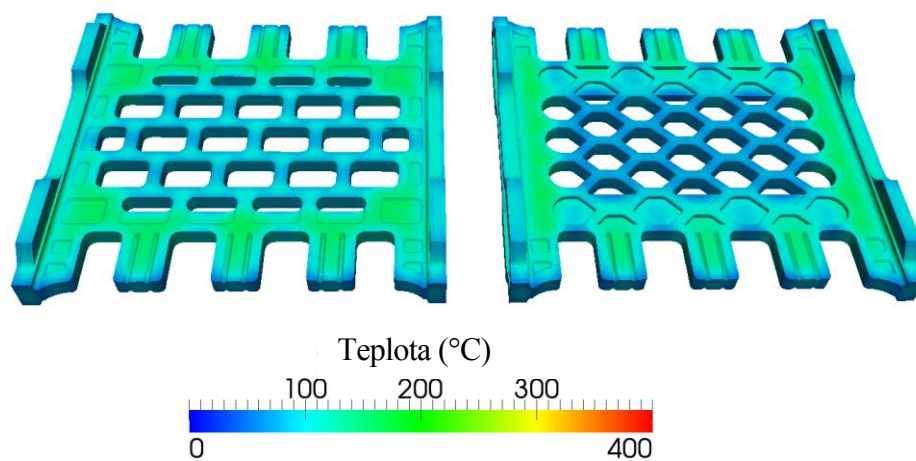
Toto zatížení má simulovat reálnou situaci, kdy je H-kazeta vystavena proudu vzduchu, jehož teplota je výrazně nižší než teplota hmoty samotné kazety. Tato úloha byla řešena jako sdružená termomechanická úloha.

Zadané parametry:

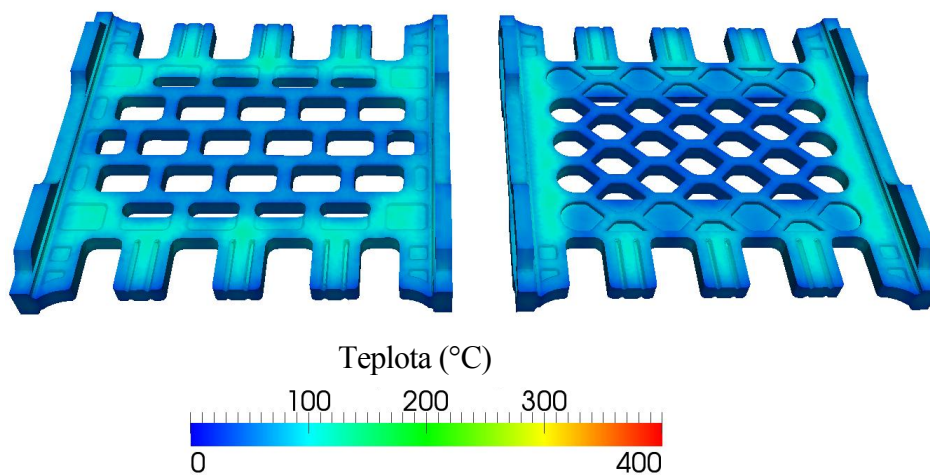
- Přestup tepla $\alpha = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- Počáteční teplota $t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ochlazení $\Delta t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

Na obrázku 3.10 je vykreslen průběh teploty v čase na povrchu kazet, s přírůstkem času $\Delta t = 60 \text{ sec}$. V 5-ti krocích, tedy v 5-ti minutách je znázorněno postupné ochlazování povrchu kazet.

a) $t = 60 \text{ sec}$ b) $t = 120 \text{ sec}$ c) $t = 180 \text{ sec}$

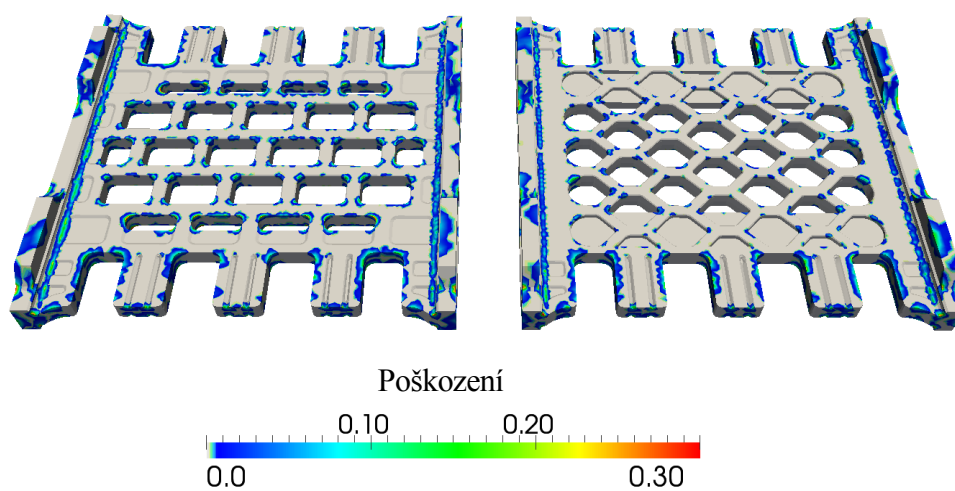


d) $t = 240\text{sec}$



e) $t = 300\text{sec}$

Obr. 3.10 Průběh teploty na povrchu kazet v čase při zatížení teplotním šokem



Obr. 3.11 Poškození způsobené teplotním šokem

Výsledky prokázaly, že zatížení teplotním šokem se krátkodobě na porušování H-kazet prakticky nepodílí. Dochází pouze ke vzniku mikrotrhlin, které mají z hlediska únosnosti zanedbatelný vliv. Obecně však platí, že při opakovaném zatěžování bude docházet k rozvoji těchto mikrotrhlin, k jejich spojování a následně k úplné destrukci. Tento typ zatěžování bude tedy nabývat na významu spolu s přibývajícím počtem cyklů zatěžování.

Ze získané odezvy na tento typ zatěžování nelze s dostatečnou určitostí stanovit výhodnější z analyzovaných kazet. V jejich chování se při takto nízkém stupni poškození rozdíly prakticky neprojeví.

4. Závěr

V předešlých kapitolách byly popsány dvě H-kazety - referenční a Silike. Obě kazety se vyskytují v reálném provozu. Výsledky simulací ukazují na srovnatelné chování obou kazet při zatěžování kroucením a teplotním šokem. Podle uskutečněné analýzy se v případě zatěžování smykem při zatížení posunem vlastnosti kazety Silike jeví jako výhodnější, její únosnost je znatelně vyšší než únosnost referenční kazety.

Předložené výsledky se dají využít pro vytvoření hrubé představy o chování H-kazet na reálné zatížení. Získané výsledky mají posloužit jako nástroj pro budoucí navrhování nových tvarů H-kazet.

II. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S KERAMICKOU MATRICÍ

1. ÚVOD

Samotná keramika, která je předmětem předložené diplomové práce, vykazuje značnou křehkost, což je její velkou nevýhodou. Jednou z možností zvýšení houževnatosti je přidání textilní výztuže, čímž vzniká kompozitní systém. Mezi nejčastější textilní výztuže patří například skleněná, keramická, uhlíková nebo čedičová vlákna.

Kompozitní materiály nacházejí stále větší uplatnění napříč širokou škálou nejrůznějších oborů. Svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi mnohdy překonávají ve svých aplikačních možnostech nejrozšířenější materiály, jakými jsou kovy, beton a ostatní tradiční materiály, což umožňuje vytvářet výrobky zcela unikátních vlastností.

V praxi je ve většině případech kompozitní materiál vyráběn v jednom kroku s konečným produktem a je tedy obtížné oddělit vlastnosti materiálu od užitných vlastností výrobku. Z tohoto důvodu existuje velmi omezená databáze konstrukčních dat pro samotné kompozity. Proto jsou v technické praxi využívány matematické modely - simulace umožňující predikci vlastností navrhovaných kompozitních systémů na základě znalosti vlastností vyztužujících vláken a polymerních matric, znalosti časově-teplotních režimů vytvrzování matric apod. Do výpočtu dále vstupuje i složitá vnitřní geometrie kompozitního systému, která závisí jednak na technologii přípravy kompozitu, dále na typu použité textilní výztuže.

Kompozity s textilní výztuží patří v současnosti k nejdynamičtěji se rozvíjející skupině "nových materiálů". Patří mezi heterogenní materiály se složitou, většinou porézní strukturou. Dokonce ani na úrovni mikrostruktury zde nenajdeme homogenní materiál. Modelování takového materiálu je velmi náročné, a proto se zavádí poměrně velké zjednodušení. Výsledky získané numericky tedy nemusí zcela korespondovat s experimentálním měřením. Pokud se modelováním dosáhne přijatelného rozdílu ve srovnání se skutečnými výsledky, stává se predikce výsledků počítačovým simulováním velmi cenným nástrojem, jak ušetřit čas i finanční prostředky pro stanovení efektivních vlastností [5].

Tento oddíl diplomové práce, který je součástí projektu č. 105/11/0224, se zabývá keramickými kompozitními materiály vyztuženými čedičovou, skleněnou a uhlíkovou textilní výztuží s plátňovou vazbou, a to zejména z hlediska tvorby geometrického modelu analyzovaných kompozitů a ověření homogenizačních postupů při stanovení jeho efektivních elastických vlastností.

Tento projekt se skládá ze dvou základních částí - experimentální a výpočetní.

Cílem tohoto oddílu diplomové práce je vytvoření geometrického modelu statisticky ekvivalentní periodické jednotkové buňky analyzovaných vzorků a následně stanovení efektivních elastických vlastností na těchto buňkách metodou Mori-Tanaka a metodou konečných prvků.

2. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Převážná většina existujících materiálů, ať již přírodních či vyrobených člověkem, se řadí mezi kompozitní, tedy heterogenní materiály složené ze dvou nebo více složek. Jednotlivé složky kompozitu se nazývají fáze a ve většině případech se výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Obvykle je jedna fáze spojité, poté mluvíme o matici. Fázi, která je nespojitá, nazýváme výztuž [6].

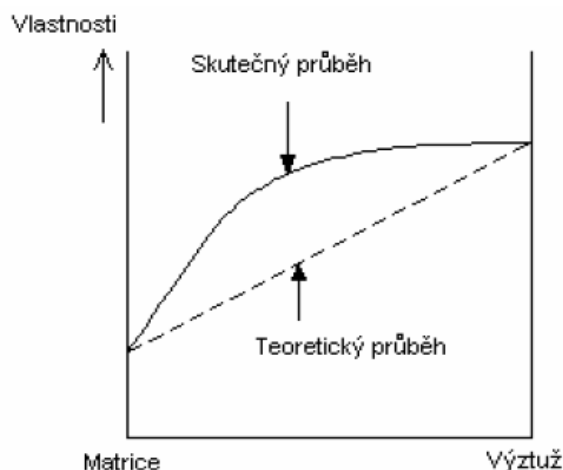
Kompozity mohou být jednovrstvé nebo mnohovrstvé. Do mnohovrstvých kompozitů patří lamino, což je jedna vrstva vícevrstvého vláknového kompozitu, dále laminát, který je tvořen dvěma a více shodnými vrstvami - laminy, a hybridní laminát, který je také tvořen několika vrstvami, ovšem s tím rozdílem, že jednotlivé vrstvy jsou tvořeny z různých složek.

Aby byl vícefázový materiál chápán jako kompozit, musí dle [7] splnit následující podmínky:

- mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti výztuže a matrice se liší
- výztuž je pevnější v tahu a je tužší než matrice
- podíl výztuže v kompozitu je vyšší než 5%.

Výsledné vlastnosti kompozitu jsou silně ovlivňovány vlastnostmi materiálových složek, jejich distribucí a interakcí mezi nimi. Žádná jeho složka jich nedosahuje samostatně a mnohdy se tyto vlastnosti neblíží ani hodnotám, které by se daly předpokládat jejich prostým součtem. Takovýto účinek se nazývá synergický [8].

Slovo synergie pochází z řeckého *syn – ergazomai* a v překladu znamená spolupracovat, spolupráce nebo také společné působení. Příkladem tohoto jevu může být keramická matrice vyztužená keramickými vlákny. Samostatně jsou tyto složky velmi křehké, ale výsledný kompozit vykazuje určitou míru houževnatosti. Synergické chování kompozitů je znázorněno na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 Synergický jev

Kompozitní materiály lze klasifikovat podle řady parametrů. Podle [9] lze kompozity dělit následujícím způsobem:

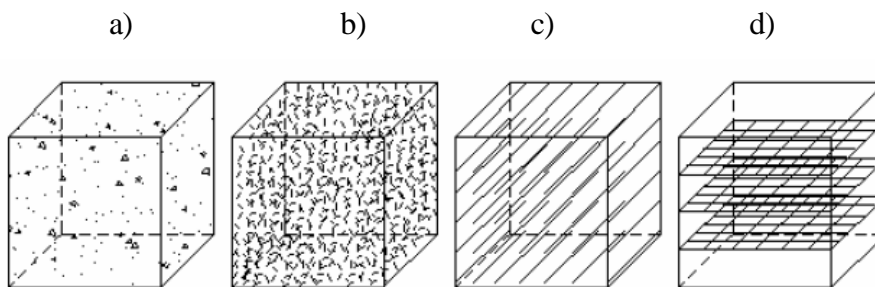
Kompozity podle povahy matrice:

- s kovovou maticí (metal matrix composites – MMCs),
- s polymerní maticí (polymer matrix composites – PMCs),
- s keramickou maticí (ceramic matrix composites – CMCs),
- se skleněnou maticí,
- s uhlíkovou maticí.

Kompozity podle geometrie výztuže:

- Vláknové:
 - dlouhovláknové
 - jednosměrové
 - s jedním druhem vláken
 - s více druhy vláken (hybridní)
 - vícesměrové
 - s jedním druhem vláken
 - s více druhy vláken (hybridní)
 - krátkovláknou
 - s náhodnou orientací
 - s přednostní orientací
- Částicové:
 - s náhodnou orientací

- s přednostní orientací



Obr. 2.2 Druhy kompozitů podle geometrie výztuže:

- a) částicové
- b) vláknový - s krátkými vlákny
- c) vláknový - s dlouhými vlákny, jednosměrný
- d) vláknový - s dlouhými vlákny, vícesměrný [10]

Pro kompozitní materiály je charakteristické, že se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek, tím se liší např. od slitin, které jsou rovněž heterogenní.

2.1. Kompozitní materiály v praxi

Myšlenka kompozitních stavebních konstrukcí je z historického hlediska velmi stará. Už ve starém Egyptě byly používány kompozitní cihly vyrobené ze směsi jílu (pojivo, matrice) a slámy (výztuž), které ve srovnání s čistě jílovými nevypalovanými cihlami byly méně křehké.

V 19. století byly běžně používány ocelové tyče k vyztužení zdí, což vedlo ke vzniku předpjatého betonu. K rozvoji a širokému průmyslovému využití kompozitních materiálů došlo až po roce 1940. První laminátový člun byl vyroben v roce 1941 [11].

V posledních letech se stále častěji přechází k používání kompozitů místo tradičních materiálu, jako je například ocel. To je dáno nízkou hmotností vlastního kompozitu, specifickými vlastnostmi jednotlivých složek a možností vytvořit kompozit přímo pro daný účel. Protože jde o kombinaci materiálů, mohou se kompozity navrhovat s ohledem na specifické vlastnosti, které přinášejí řadu výhod v porovnání s tradičními materiály.

O výhodách spojených s použitím kompozitních materiálů ve stavebnictví se obecně ví, ale malý pokrok v jejich masovém použití ukazuje, jak obtížně se u nich dosahuje ekonomická cena, která

ve formě přímých nákladů je často hlavním a jediným parametrem při rozhodování o jejich aplikaci. Dále mají kompozity pro stavební konstrukce tu nevýhodu, že se s nimi potencionální zájemci často seznamují bez hlubší znalosti jejich možností a výhod.

Ve stavebnictví je snaha zařadit vláknové kompozity mezi běžné stavební materiály. Z materiálového hlediska nepředstavuje použití vláknových polymerních kompozitů pro stavební konstrukce revoluční krok, spíše jde o logický vývoj od přírodních kompozitů, jakými jsou např. dřevo, přes člověkem vytvořené složené materiály, které v době svého vzniku nebyly chápány jako kompozity, až ke konstrukcím hybridním a zcela kompozitním, které jsou schopny plně využít jak předností jednotlivých složek, tak jejich synergické spolupráce.

Všechny hlavní přednosti vláknových kompozitních materiálů, tj. příznivý poměr pevnosti a hmotnosti, odolnost proti únavě a vlivům prostředí, mechanické vlastnosti šité na míru a relativně snadná tvarovatelnost, dále pak dlouhodobá životnost a velmi nízké požadavky na údržbu, vedou ke snaze jejich využití v nejvyšší možné míře.

2.2. Matrice

Matrice v kompozitním materiálu zastává význam pojiva, jejím úkolem je také ochrana výztuže před vnějšími vlivy a zachování polohy výztuže pro zajištění dobrých mechanických vlastností. Kromě spojitosti bývá další vlastností matrice zpravidla houževnatost a plasticita. Volba matrice zásadním způsobem ovlivňuje výsledné vlastnosti kompozitu, např. určuje odolnost proti korozi, chemickou odolnost, odolnost proti teplotě a ohni a také elektro-izolační vlastnosti. Ve vláknových kompozitech matrice vyplňuje prostor mezi vyztužujícími vlákny a přenáší na ně vnější namáhání prostřednictvím válcového povrchu výztuže.

2.2.1. Keramická matrice

Ke kompozitům s keramickou maticí se obvykle řadí také kompozity se skleněnými a uhlíkovými maticemi. Pro tyto materiály se používá označení CMCs. Někdy se do této skupiny řadí i kompozity s uhlíkovou maticí. Keramické matrice se poté podle [12] dělí na 4 základní skupiny:

- sklokeramické
- oxidové
- nitridové
- karbidové

Keramické matrice vynikají výbornou tepelnou odolností, toho je využíváno při kosmických aplikacích. Bez výrazných ztrát mechanických vlastností odolávají i teplotám vyšším než 1000°C. Dále je u nich významná malá tepelná roztažnost, tvrdost a křehkost. Křehkost je dána velmi malou plastickou deformací při porušení materiálu.

Keramika je anorganická, nekovová a ve vodě prakticky nerozpustná. Na rozdíl od polymerních a kovových matric obecně podléhají keramické matrice selhání nebo v nich vznikají mikrotrhliny dříve, než je tomu u výztuže. Děje se tak již při deformacích do 0,5 % [12].

V současné době nejsou připraveny vzorky vyrobené při teplotách vyšších než 1000°C pro určování efektivních elastických vlastností experimentálně, při kterých dochází k přechodu od polymerního stavu k anorganickému, ale pouze při 200°C. O použité matrici hovoříme stále jako o polymerní, reaktoplastické matrici s obchodním označením Lukosil M130. Předložená práce je tedy přípravnou fází analýzy skutečných keramických kompozitů.

2.2.2. Lukosil

Informace o lukosilech lze najít např. na internetové stránce [13]. Lukosil patří do skupiny silikonových laků. Silikonové laky tvoří velkou skupinu silikonových výrobků, které jsou dodávány k použití ve formě roztoků v organických rozpouštědlech. Po nanesení a vytvrzení vykazují řadu vynikajících vlastností, jako jsou:

- odolnost ve velkém rozsahu teplot;
- hydrofobní vlastnosti;
- separační vlastnosti filmů (plastické hmoty, potraviny);
- odolnost proti povětrnostním vlivům a UV záření;
- možnost modifikace organických pryskyřic.

Silikonové laky se dělí na dvě skupiny, a to na metylsilikonové a metylfenylsilikonové.

Metylsilikonový lak Lukosil M 130

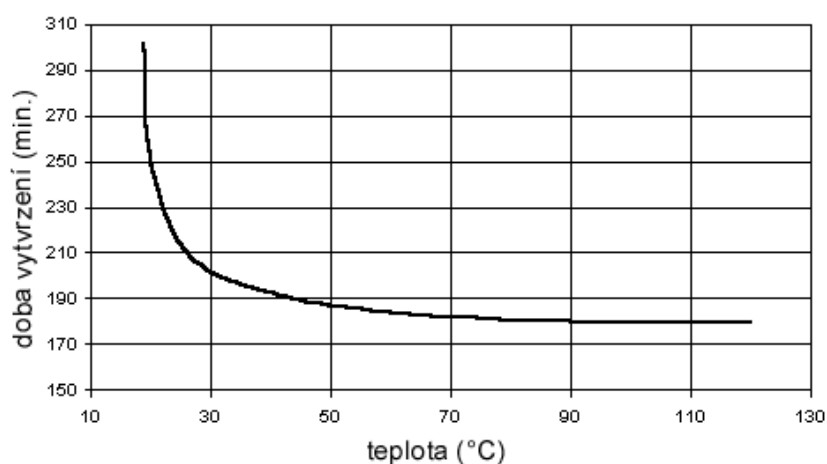
Metylsilikonový lak Lukosil M 130 představuje moderní typ za pokojové teploty zasychajícího silikonového laku a je špičkovým výrobkem ve své kategorii. Je to roztok silikonové pryskyřice v xylenu jako rozpouštědle. Při pokojové teplotě vytváří nelepivý, pružný a mechanicky poměrně odolný film. Tepelným vytvrzením se dosáhne zvýšení jeho tvrdosti, mechanické a chemické odolnosti a stabilizuje se pro trvalé tepelné namáhání.

Některé důležité parametry Lukosilu M130 jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Obsah netěkavých složek [%]	50 ± 2
Měrná hmotnost [kg/m ³]	1000 - 1020
Viskozita při 20°C [mPa.s]	30 - 40
Bod vzplanutí [°C]	27
Číslo kyselosti [mg KOH/g]	0,02
Třída hořlavosti	2
Doba schnutí [hod]	max. 8

Tab. 2.1 Důležité parametry Lukosilu M130 [13]

Lukosil M 130 je možné vytvrdit teplotou bez použití katalyzátoru. Závislost doby vytvrzení na teplotě je znázorněna v grafu na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Závislosti doby vytvrzení lukosilu M 130 na teplotě [13]

Hlavní použití Lukosilu M 130 je jako pojivo pro výrobu tepelně odolných nátěrových hmot s použitím do 350 °C. Pro svoje výborné separační vlastnosti je možno ho použít jako mechanicky odolný separační nátěr forem pro odlévání a lisování pryskyřic, plastických hmot a kaučuků. Pro tyto účely je třeba nátěr tepelně vytvrdit a není nutno použít katalyzátor. Další využití je jako pojivo elektroizolačních a tepelně odolných směsí při výrobě elektroizolačních desek. Používá se rovněž jako ochranný nátěr desek tištěných spojů.

2.3. Kompozity s keramickou maticí

Hlavním cílem výroby keramických kompozitů je zvýšení lomové houževnatosti, která je jinak u monolitické keramiky velmi nízká a dochází u ní ke křehkému lomu. To je její zásadní nevýhoda při využití keramiky pro konstrukční aplikace. Naopak výhodou keramické matrice je dobrá pevnost v tahu i při teplotách, kterým některé kovové matrice již nejsou schopny odolávat a zajišťuje tak výslednému kompozitu dobrou tepelnou odolnost [12].

Zpracování kompozitních materiálů s keramickou maticí probíhá za vysoké teploty. Pro takové zpracování je potřeba omezit výběr vláknenné výztuže pouze na takovou, která je dostatečně tepelně odolná. Pro vláknennou výztuž, která nesplňuje podmínky tepelné odolnosti, se musí zvolit jiný způsob zpracování, a to vznik keramické matrice chemickou reakcí. Dalším způsobem výroby keramických kompozitů je tzv. prášková metoda, kdy se matrice ve formě prášku spolu s vlákny lisuje za vysoké teploty. Tato metoda se dá použít také pouze v případě vysoké tepelné odolnosti vyztužujících vláken. Touto metodou se dají vytvářet poměrně komplikované 3D tvary.

2.4. Výztuž

V porovnání s maticí má výztuž obvykle výrazně vyšší mechanické vlastnosti, jako je např. Youngův modul pružnosti, pevnost a tvrdost. Hlavním úkolem výztuže je tedy zlepšení uvedených vlastností výsledného kompozitu [14].

2.4.1. Částicové kompozity

Částicové kompozity jsou takové, které mají výztuž výrazně nepřesahující jedním svým rozměrem rozměry ostatní. Takové kompozity mají obvykle spojitou polymerní, keramickou nebo kovovou matici fungující jako pojivo. V matici jsou nahodile rozptýleny částice sekundární fáze, neboli plniva. Částice plniva mají nejčastěji tvar blížící se kulovitému, dále může být např. destičkovitý, tyčinkovitý, ale i nepravidelný [15]. Objemový podíl částic je obecně menší, než u vláknových kompozitů [16]. Výsledné vlastnosti tedy více určuje matrice, opět záleží na jejím procentuálním objemovém zastoupení. Částicové výztuže, nebo také partikulované, se používají zejména pro zvýšení pevnosti, ořezuvzdornosti a odolnosti při zvýšených teplotách [17].

Přestože kompozit není nikdy izotropním materiálem, částicové kompozity s výztuží směrově neuspořádanou za izotropní považujeme. Klasickým příkladem částicového kompozitu je beton.

2.4.2. Vláknové kompozity

Pro výztuž vláknových, nebo také fibrilárních kompozitů je charakteristický výrazně větší rozměr v jednom směru oproti ostatním. Vláknové kompozity se dále dělí na dlouhovláknové a krátkovláknové, někdy se používá označení kontinuální a diskontinuální. Orientace vláken může být nahodilá či uspořádaná.

U krátkovláknových kompozitů je délka vyztužujících vláken výrazně menší v porovnání s velikostí daného výrobku, u dlouhovláknových kompozitů jsou tyto rozměry srovnatelné [9]. O který typ se jedná, lze určit také z tzv. aspektního poměru (aspect ratio) L/D , kde L je délka a D průměr vlákna. Jestliže rozměr délky výrazně převyšuje průměr vlákna, pak poměr $L/D > 100$ a kompozit je dlouhovláknový, naopak $L/D < 100$ platí pro krátkovláknový kompozit [12].

Kompozity s dlouhými vlákny mohou být jednovrstvé nebo mnohovrstvé. Mezi mnohovrstvé kompozity patří lamináty a hybridní lamináty. Jak je již popsáno v úvodu druhé kapitoly, laminát je vláknový kompozit, který je tvořen více vrstvami, které se nazývají lamina. Lamino je tedy jedna vrstva vícevrstvého vláknového kompozitu. Pro lamináty musí platit, že materiály složek kompozitu jsou v každé vrstvě shodné. Jednoduše řečeno, laminát je kompozit ze dvou a více lamin. Hybridní laminát je také tvořen více vrstvami, jednotlivé vrstvy jsou však tvořeny z různých složek [18].

Význam kompozitních materiálů vyztužených vlákny stále roste. Vlastnosti vláknového kompozitu silně závisí na směru uložení vláken. V případě jednovrstvého kompozitu se jedná o materiál ortotropní.

Rozdíl mezi ortotropním a anizotropním materiálem je v tom, že u ortotropního materiálu je možné najít tři na sebe kolmé osy, v jejichž směrech se materiál chová jako izotropní, tj. deformují se pouze délkové rozměry. Tyto tři osy se nazývají osy souměrnosti.

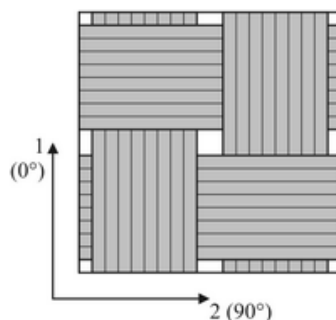
V praxi jsou kompozity s význačnými vlastnostmi ve třech na sebe kolmých směrech nejpoužívanější [9].

Vlákna pro keramické kompozitní materiály mohou být vyráběna z celé řady materiálů. Nejčastěji používanými typy jsou dle [7] vlákna skleněná, uhlíková, čedičová, polymerní, proteinová, borová a keramická.

Předložená práce se zabývá kompozity se skleněnou, čedičovou a uhlíkovou dlouhovláknovou výztuží provázanou plátňovou vazbou.

2.4.3. Plátňová vazba

Plátňová vazba zobrazena na obrázku 2.3 je nejjednodušší a nejhustěji provázaná vazba. Jedná se o nejpevnější a nejtrvanlivější oboustrannou vazbu ze dvou navzájem kolmých soustav nití - osnovy a útku, viz [19]. Typické je pravidelné střídání překřížení těchto dvou soustav.



Obr. 2.4 Experimentální buňka plátňové vazby

2.4.4. Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou vlákna anorganická a v oblasti průmyslu nacházejí stále větší uplatnění. Na rozdíl od masivního skla mají skleněná vlákna vyšší pevnost v tahu a používají se pro výrobu moderních kompozitních materiálů. Skleněná vlákna jsou tradičním výrobkem českého průmyslu. Vyrábějí se ve formě stříže nebo nekonečných vláken vhodných pro další využití v různých průmyslových odvětvích, např. chemických nebo stavebních.

Vzhledem k amorfnímu stavu skleněných vláken máme velmi málo poznatků o jejich mikrostruktura. Ten je způsoben nepatrnou krystalizační rychlostí směsí oxidů při ochlazování taveniny.

Pro skleněná vlákna je typická vysoká pevnost. Předpokládá se, že vedle tzv. velikostního faktoru se na pevnosti podílí odlišná struktura jádra a povrchových vrstev. (Velikostním faktorem se míní fakt, že na malém povrchu vznikají pouze malé defekty v tenkém vlákně.) Zatímco jádro obsahuje nahodile orientovanou síť kovalentně vázaných atomů, povrch má pravděpodobně semi-orientovanou strukturu. Na povrchu tak vzniká vysoké tlakové napětí v podélném směru, které zabraňuje snadnému rozvoji trhlin při tahovém zatížení vlákna.

Různé publikace uvádějí různé mechanické vlastnosti skleněných vláken, ovšem není u nich uvedeno, při jakém průměru vláken byly tyto hodnoty naměřeny. Je však známo, že čím menší mají vlákna průměr, tím je jejich pevnost v tahu vyšší. Poté i výsledné kompozity mají vyšší

pevnost v tahu. Kompozity s vlákny větších průměrů mají zase vyšší pevnost v tlaku působícím ve směru vláken. Nejběžnější průměr vyráběných skleněných vláken je z technologických důvodů 7 až 15 μm .

Skleněná vlákna mají výborné technické vlastnosti:

- vysoká pevnost
- vysoká hodnota Youngova modulu pružnosti
- odolnost vůči vysokým teplotám
- nehořlavost
- dobrá chemická odolnost
- dobré elektrické vlastnosti
- vynikající tepelně a zvukově-izolační vlastnosti

Skleněná vlákna jsou používána ke konstrukci vláknových kompozitů o vysoké kvalitě s vysokými nároky na mechanické a tepelné vlastnosti. Konečné výrobky se využívají především v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, leteckém průmyslu, chemickém průmyslu, elektrotechnice a v jiných odvětvích. V elektrotechnickém průmyslu se aplikují zejména ve výrobě laptopů, počítačů a mobilních telefonů. V současné době se věnuje větší pozornost výrobě a použití skleněných vláken ve formě nekonečného vlákna.

Informace o skleněných vláknech byly získány z [20, 21].

2.4.5. Čedičová vlákna

Čedičová vlákna patří mezi méně známá anorganická vlákna, která se v současnosti používají zejména pro výrobu tepelně-izolačních materiálů, ovšem stále nacházejí větší uplatnění i v oblastech, kde se doposud používala vlákna skleněná nebo azbestová. Vzhledem k jejich vynikajícím mechanickým, chemickým a tepelně-izolačním vlastnostem je tomu tak i v technické praxi.

Čedičová vlákna se používají jako levnější varianta skleněných nebo azbestových vláken, která jsou v současnosti omezována, navíc je předčí svými mechanickými, fyzikálními i chemickými vlastnostmi. Srovnání některých technických vlastností vláken čedičových a skleněných je v tabulce 2.2. Surovina pro výrobu těchto vláken je velmi levná a také v přírodě snadno dostupná.

Výhodou jejich používání je také zátěž na životní prostředí, která je ve srovnání s jinými vlákny menší, což se týče jejich výroby a likvidace [22].

Významnou vlastností čedičových vláken je také mrazuvzdornost, o které se zde dá hovořit až do teploty -260°C .

Ve stavebním průmyslu nacházejí uplatnění například jako geotextilie, armovací tkaniny, žáruvzdorné stavební hmoty, plniva do tmelů, tepelně-izolační směsi, výztuže v kompozitech, tepelně-izolační desky, vhodné pro izolaci šikmých střech, stropů, příček, fasád a podlah. Výrobky mohou být také pro technické izolace, kde je využívána například zvuková a tepelná izolace vhodná pro použití na kotle a jiná topná tělesa. Dále pak na vzduchotechnická zařízení, komíny, výfuky a jiné. Nejčastější průměr vyráběných čedičových vláken se pohybuje od 9 do 12 μm .

Některé technické vlastnosti:

- nízká hustota
- malá navlhavost (minimální nasákavost)
- vysoký modul pružnosti
- výborná pevnost v tahu
- malá změna pevnosti v tahu ve vlhku

	Čedič	Sklo	
Hustota při 20°C	2 900	2 600	kg/m^3
Navlhavost	0,5	0,1	%
Modul pružnosti v tahu	100 000	70 000	MPa
Pevnost v tahu	1 850 - 2 150	1 850 - 2 150	MPa
Pevnost v tlaku	300	300	MPa
Změna pevnosti v tahu při relativní vlhkosti 100% za 64 dny	91	70	%
Pracovní teplota	82	52	$^{\circ}\text{C}$
Měrná tepelná vodivost	0,027 - 0,033	0,029 - 0,035	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Specifický odpor	1E+12	1E+11	W.m

Tab. 2.2 Porovnání fyzikálních vlastností čedičových a skleněných vláken [23]

Z tabulky lze vyčíst, že vlastnosti čedičových a skleněných vláken jsou velmi podobné, v případě hustoty, navlhavosti a pružnosti vychází jako lepší materiál čedičové vlákno, navíc vzhledem k lepší ceně čedičových vláken je jeho použití výhodnější.

Drobnou nevýhodu představuje jemnost křehkost samotných čedičových vláken, tudíž práce s tímto materiálem musí probíhat velmi opatrně.

2.4.6. Uhlíková vlákna

Hlavním zdrojem informací o uhlíkových vláknech je zde [24].

Uhlíková vlákna jako technický materiál jsou známá zhruba 50 let, postupně byly vyvíjeny nové typy vláken se speciálními vlastnostmi. Pevnost, modul pružnosti, elektrická a tepelná vodivost nabývají stále vyšších hodnot.

Uhlíková vlákna mohou být rozdělena do dvou základních skupin na HS („high strength“) a HM („high modulus“). Vlákna HS se vyrábějí za teploty 900 °C až 1500 °C a jsou velice pevná. Říká se jim také vysokopevnostní. HM vlákna se získávají při teplotách v rozmezí od 2000 °C až do 2800 °C a vyznačují se vysokým modulem pružnosti v tahu, označují se jako karbonová vlákna [25]. Podrobnější rozdělení uhlíkových vláken je v [24].

Běžná uhlíková vlákna na bázi polyakrylonitrilové suroviny mají průměr (u nekruhových vláken ekvivalentní průměr) okolo 7 μm. Vlákna nové generace s vyššími užitnými parametry mají díky jemnější surovině průměr nižší a to 4 - 6 μm. Vlákna na bázi smol mají obvykle průměr větší než 10 μm. Uhlíková vlákna z polyacetylenů mají průměr okolo 25 μm.

Uhlíková vlákna vykazují určitý stupeň pórovitosti, přesněji řečeno mikropórovitosti. Ten vyplývá z jejich struktury a je jednoduše prokazatelný nižší hustotou, než odpovídá masivnímu grafitu. Z rentgenových měření lze ověřit hustoty matrice a stanovit průměrnou pórovitost vláken. Pórovitost závisí na původní surovině, procesu dloužení, tepelném zpracování i povrchové úpravě. Póry ve vláknech jsou orientovány převážně rovnoběžně s osou vlákna. U povrchu jsou většinou póry jemnější.

Mechanické vlastnosti:

- vysoká pevnost v tahu
- vysoký modul pružnosti v tahu
- odolnost proti únavě
- útlum vibrací
- nízká měrná hmotnost
- nízký koeficient tření
- nulová plastická deformace při namáhání

Tepelné vlastnosti:

- nízký koeficient tepelné roztažnosti

- široké rozpětí koeficientu tepelné vodivosti
- odolnost proti tepelným rázům
- odolnost proti vysokým a nízkým teplotám

Zvláštnosti uhlíkových vláken [26]:

- Anizotropie mechanických vlastností - ve směru kolmém k ose vlákna mají vlákna modul pružnosti výrazně menší.
- Křehkost - prodloužení při přetržení je menší než u skleněných vláken, minimální poloměr při ohýbání je proto větší než u skleněných vláken.
- Záporný koeficient délkové teplotní roztažnosti, tj. při ohřevu se vlákno zkracuje (výjimkou jsou například vlákna XN od společnosti Nippon). Ve směru kolmém má kladnou hodnotu a je větší než u vláken skleněných.
- V podélném i příčném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor.

Technologický vývoj v oblasti uhlíkových vláken neustále pokračuje dál k vyšším mechanickým parametrům a k jejich lepšímu využití.

Uhlíkové materiály se neustále rozvíjí, poprvé se jejich použití odhaduje na 16. století. V mnohých aplikacích jsou nezastupitelné a jejich význam stále roste. Uhlíková vlákna nachází své uplatnění i jako samostatný materiál, ale používají se především k výrobě kompozitů. Své uplatnění nacházejí téměř ve všech oblastech lidské činnosti, ovšem stále ještě poměrně vysoká cena uhlíkových vláken směřuje jejich aplikace ve větší míře na obory, v nichž tento handicap nehraje tak významnou roli.

2.5. Struktura kompozitu

Všeobecně platí, že při popisování struktury se hledí na to, jak moc přesné informace jsou potřeba. Z těchto důvodů jsou používány tyto pohledy na strukturu [27]:

- Ideální struktura
- Reálná struktura
- Virtuální struktura

Ideální struktura

Ideální struktura zanedbává spoustu vlivů typických pro strukturu reálnou. Ve většině případů se jedná o teoretický model, který nemusí být založen na skutečných případech. Jedná se o velmi jednoduchý model, pro který platí přesná periodicitu, což je její největší výhodou.

Nahodilá složka je vyloučená. Používá se při hrubém odhadování vlastností zkoumaného materiálu.

Reálná struktura

Reálná struktura se získává experimentálním pozorováním. Jednou z metod je snímání řezů kompozitu, čímž se získá velké množství geometrických dat. Zde je nasnímana i nahodilá složka, tudíž periodicitu se nedá uvažovat. Přestože se touto metodou nedá získat prostorová struktura materiálu, dává přesnější informace o zkoumané struktuře kompozitu. Nevýhodou je, že se všechny nasnímané řezy svou strukturou liší.

Virtuální struktura

Virtuální struktura se velmi blíží reálné struktuře. Získává se z velkého množství nasnímaných řezů pomocí generátorů nahodilých čísel [28].

3. EXPERIMENT

V této kapitole je stručně popsána výroba vzorků analyzovaných kompozitů,

Cílem experimentu bylo stanovení makroskopických elastických vlastností vybrané skupiny kompozitů. Výroba kompozitů a jejich snímání bylo provedeno na TU v Liberci, fakultě textilní. Stručný popis výroby kompozitu a snímání příčných řezů je uveden v následujících kapitolách, podrobněji lze celou proceduru včetně tvorby nábrusů najít v [29].

3.1. Výroba kompozitů

Pro experiment byly vyrobeny 3 druhy kompozitů s lukosilovou maticí, kde výztuž tvoří:

- Čedičová tkanina
- Skleněná tkanina
- Uhlíková tkanina

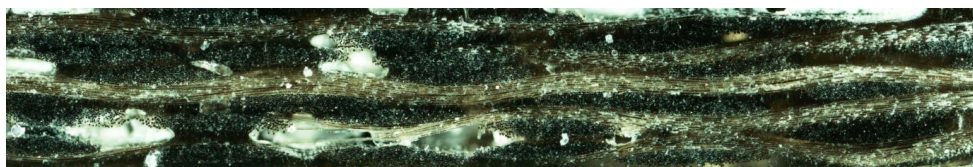
Pro výrobu kompozitů s výztuží ve formě tkanin byla vybrána již zhotovená čedičová, skleněná a uhlíková tkanina v plátnové vazbě 1 x 1. Kompozit se vyráběl vrstvením příslušných výztuží a byl průběžně sycen maticí, po prosycení maticí byl kompozit s čedičovou a uhlíkovou výztuží vypálen nejprve při 200°C, dále pak při 600°C a 1100°C, kompozit se skleněnou výztuží byl vypálen pouze při 200°C.

3.2. Snímání příčných řezů

Pro určení efektivních vlastností kompozitů matematickou analýzou je důležitá znalost nejenom vlastností jednotlivých fází, ale i jeho vnitřní struktury. K získání této struktury byly připraveny příčné řezy jednotlivých vzorků a z nich vytvořeny nábrusy, které byly poté nasnímány.

Snímání příčných řezů je velmi důležitá součást experimentu. Na této operaci je závislá přesnost veškerých pozorovaných objektů i vyhodnocených výsledků. Veškerá práce je zde prováděna pomocí programu NIS – Elements 2.3. Obraz je na monitor PC přenášán pomocí objektivu 2,5 NIKON, jehož celkové zvětšení je 25x. Jeden sejmutý obraz je mnohem menší, než jsou skutečné rozměry snímaného nábrusu. A to jak v jeho šířce, tak délce. Proto je nutné, aby byly dílčí obrazy skládány do jednoho celkového obrazu. Pro tento účel je vhodné použití

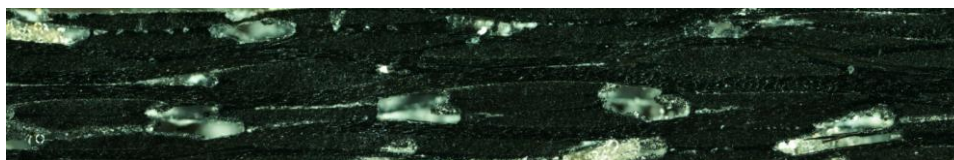
tzv. složeného obrazu. Složený obraz umožňuje skládání dílčích obrazů v horizontálním i vertikálním směru. Příklady složených obrazů jednotlivých kompozitů jsou na obr. 3.1.



a)



b)



c)

Obr. 3.1 Složený obraz

- a) kompozit s čedičovou výztuží*
- b) kompozit s uhlíkovou výztuží*
- c) kompozit se skleněnou výztuží*

3.3. Laboratorní měření

Na kompozitech vyrobených při vyšších teplotách, tedy na keramických kompozitech, bylo provedeno měření mechanických vlastností typu Charpyho test a falling test, viz [30]. Charpyho testem se zjišťuje, jakou energii je materiál schopen absorbovat, než dojde k jeho porušení, a falling test slouží k vyhodnocení materiálové průtažnosti či houževnatosti. Oba tyto mechanické experimenty jsou zaměřeny na pevnost a lomovou únosnost materiálu, oba testy definují celkovou únosnost materiálu.

Dále jsou v [30] uvedeny výsledky z experimentálního měření elektrických vodivostí keramických kompozitních materiálů, na kterých byly ověřovány dále použité homogenizační postupy, a to metoda Mori-Tanaka popsaná v kapitole 5.1.5.

Díky snadnému měření elektrické vodivosti, což se později ukázalo jako chybná domněnka, měly tyto testy posloužit pro kalibraci geometrického modelu, který by se použil pro stanovení efektivních elastických vlastností. Při experimentálním stanovování elektrických vodivostí se ale ukázalo, že jejich měření neumožňuje zcela charakterizovat chování materiálů v rovině desky a měření příčné elektrické vodivosti je silně řízeno matricí, která je, v případě kompozitů vyrobených při nižších teplotách, převážně nevodivá. Proto bylo nutné přistoupit ke kalibraci statisticky ekvivalentní periodické jednotkové buňky z pohledu mechanických vlastností, které jsou měřitelné jak z roviny, tak v rovině.

Vzhledem k tomu, že výroba keramických kompozitů, probíhající na Technické univerzitě v Liberci, je obtížná, omezili jsme se při vývoji geometrického modelu a testování homogenizačních postupů na kompozity s polymerní matricí, a proto i měření elastických vlastností bylo provedeno právě na těchto kompozitech. Vzorek vypálený při 200°C, tedy kompozit s polymerní matricí, je pro mechanické modelování a vytvoření geometrického modelu dostačující, a to z důvodu předpokladu, že geometrie kompozitu s keramickou matricí se oproti kompozitu s polymerní matricí z pohledu pórovitosti, což je fáze nejvýrazněji ovlivňující výsledné efektivní mechanické vlastnosti, téměř nezmění. Tento fakt vychází z dřívějšího experimentálního zkoumání vlivu teploty, viz [30].

Dále se tedy tato práce zabývá již pouze kompozity s polymerní matricí.

3.3.1. Polymerní matrice

Experimentálně byly Youngovy moduly pružnosti a moduly pružnosti ve smyku materiálů stanoveny ultrazvukovou metodou. Jedná se o nedestruktivní metodu založenou na měření rychlostí vln šířících se ve třech různých rovinách měřeného tělesa ponořeného do vody. Tímto způsobem se získají všechny prvky matice tuhosti, proto je tato metoda velmi vhodným nástrojem pro stanovení efektivních vlastností. Dále je tato metoda popsána v [31]. Měření bylo provedeno na čtyřech vzorcích, dvou kompozitech s výztuží z čedičové tkaniny a dvou kompozitech s výztuží z uhlíkové tkaniny. Jedno měření u každého ze zmíněných kompozitů bylo provedeno na vzorku s osnovou v příčném řezu, další pak na vzorku s útkem příčném řezu. Tuhosti kompozitu se skleněnou výztuží experimentálně zjišťovány nebyly. Experimentální měření probíhalo v laboratoři Institut de Mécanique et d'Ingénierie, Université de Bordeaux et Arts & Métiers ParisTech. Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce 3.1.

materiál - řez	E_1	E_2	E_3	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	[GPa]					
čedič - osnova	3,8	16,3	16,3	1,7	1,7	11,5
čedič - útek	3,2	6,9	7,9	1,6	1,8	11,9
uhlík - osnova	3,5	41,6	42,2	0,7	0,7	35,9
uhlík - útek	3,5	47,7	41,6	1,2	1,2	32,5

Tab. 3.1 Výsledky experimentu

Ose 3 odpovídá směr osnova, ose 2 směr útku a osa 1 je ve směru tloušťky kompozitu.

Při stanovování efektivních elastických vlastností výpočtem směr osnova a útku nerozlišujeme. Je zaveden předpoklad, že analyzované vzorky jsou v rovině desky izotropní.

Výsledky měření na uhlíku v řezu osnou a útkem jsou téměř shodné, což je v souladu se zavedeným předpokladem rovinné izotropie. U čediče se naměřené hodnoty relativně hodně liší. To je pravděpodobně zapříčiněno nekvalitou vyrobených vzorků kompozitů s čedičovou výztuží.

4. VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET

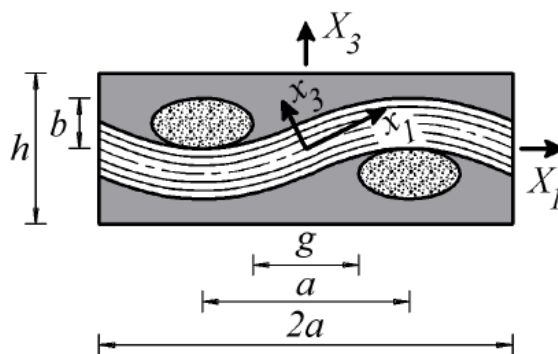
Kapitola 5 je věnována výpočtu efektivních elastických vlastností kompozitů metodou Mori-Tanaka a metodou konečných prvků - MKP, ke kterému jsou potřeba informace o objemovém zastoupení a materiálových parametrech jednotlivých fází a v případě MKP je potřebná i znalost geometrie. Získání těchto informací je popsáno v následujících kapitolách.

4.1. Stanovení geometrie

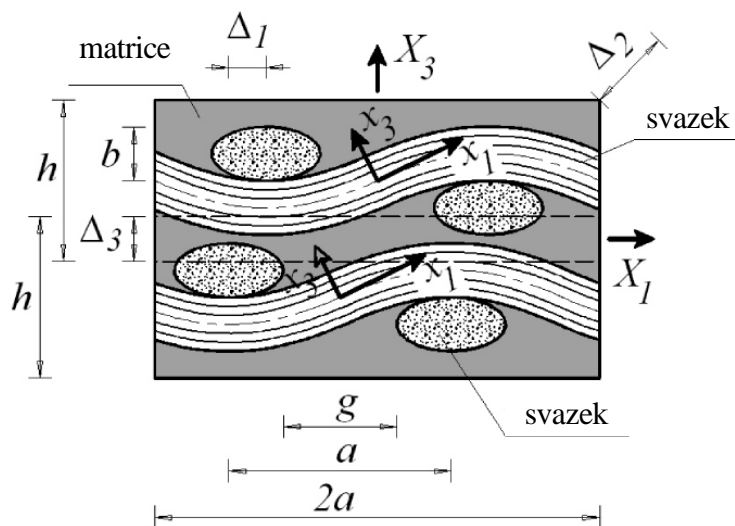
Pokud při výpočtu efektivních vlastností kompozitu nejsou informace o skutečné mikrostruktuře redukovány pouze na znalost objemového zastoupení, pak princip homogenizace spočívá ve stanovení vhodné reprezentativní objemové části materiálu - RVE (representative volume element) za předpokladu periodického uspořádání mikrostruktury, jak je popsáno v [32]. RVE shodující se s nejmenší stále se opakující buňkou se nazývá periodic unit cell - PUC, překládáno jako periodická jednotková buňka. V případě nepravidelné struktury kompozitu je skutečná mikrostruktura optimalizována tzv. statisticky ekvivalentní periodickou jednotkovou buňkou - SEPUC, viz [33]. Stanovováním RVE se podrobně zabývá [34], definici lze najít např. v [35].

4.1.1. Optimalizace buněk

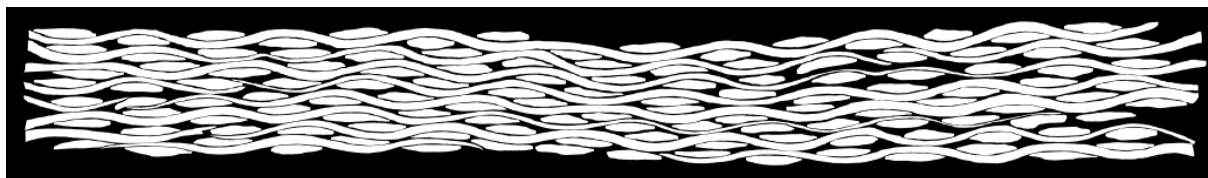
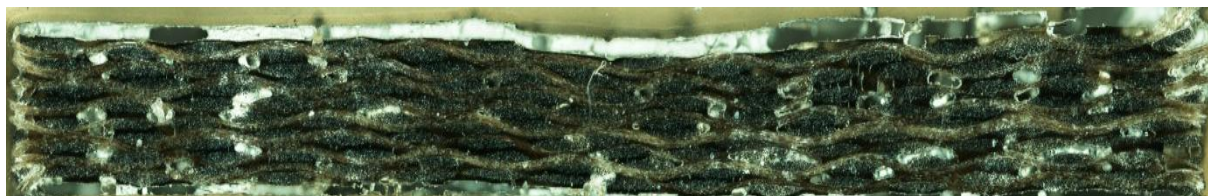
K získání geometrických parametrů SEPUC, viz obrázek 4.1, byla provedena optimalizace na řezech kompozitů v binární podobě. Převedení nasnímaných obrazů do binární podoby je zobrazeno na obrázku 4.2. Porozita nehraje při získávání geometrie žádnou roli, proto v binárních obrazech splývá s matricí a nemůže tak ovlivnit získanou geometrii. Porozita je uvažována až při samotném výpočtu efektivních vlastností. Výsledky z optimalizací jsou shrnuty v tabulce 4.1.



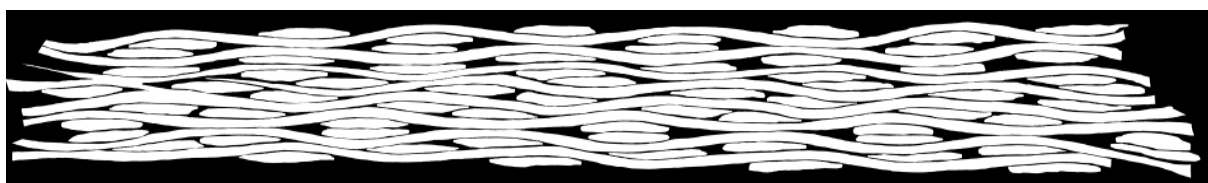
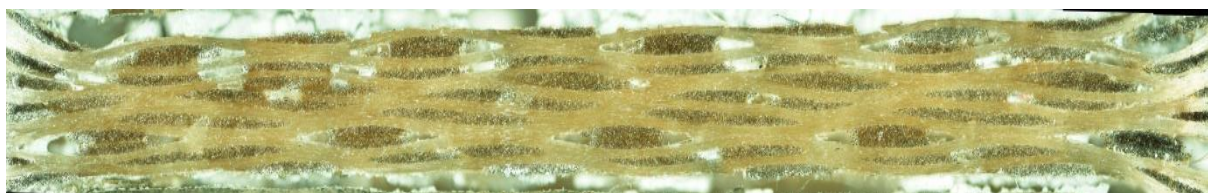
Obr. 4.1 Idealizovaný geometrický model jednovrstvé buňky



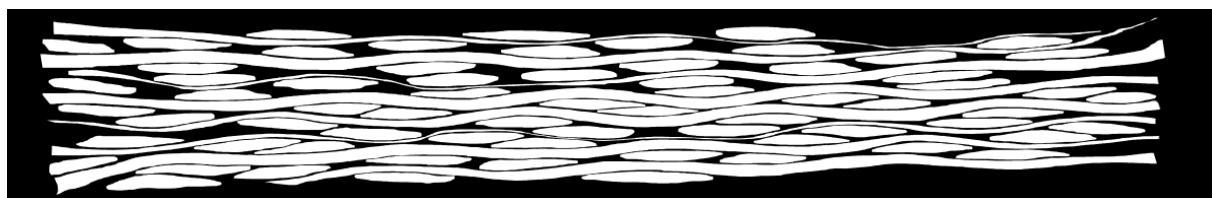
Obr. 4.2 Idealizovaný geometrický model dvouvrstvé buňky



a) kompozit s čedičovou výztuží



b) kompozit se skleněnou výztuží



c) kompozit s uhlíkovou výztuží

Obr. 4.3 Původní obrazy a binární obrazy kompozitů

Geom. parametr [μm]	Materiál výztuže		
	sklo	čedič	uhlík
a	2121,57	862,711	2035,58
b	122,436	87,0123	146,828
g	889,848	311,755	464,855
h	257,801	183,197	313,508
Δ_1	1,824727	416,822	14,2212
Δ_2	1,824727	416,822	14,2212
Δ_3	-63,6581	-52,6671	-63,0365

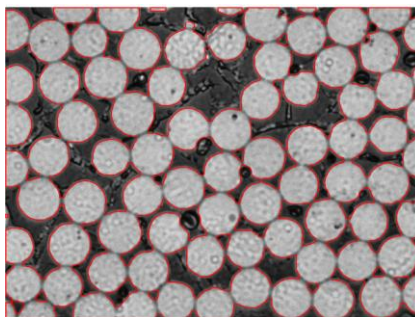
Tab. 4.1 Geometrické parametry SEPUC

Parametry Δ_1 , Δ_2 a Δ_3 znamenají posuny svazků v příčném řezu ve směrech os X_1 , X_2 a X_3 , jak je zobrazeno na obrázku 4.2. V případě $\Delta_3 = 0$ by osová vzdálenost těchto vláken ve směru osy X_3 byla rovna parametru b , v případě, že je parametr Δ_3 záporný, je jejich osová vzdálenost menší než parametr b a v případě kladného parametru Δ_3 je tomu logicky naopak.

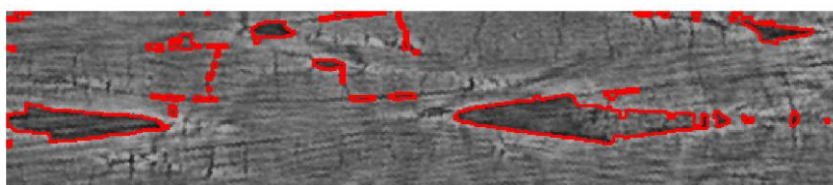
4.2. Stanovení objemového zastoupení jednotlivých fází

Objemové zastoupení jednotlivých fází, jak na úrovni svazku, tak na úrovni celého kompozitu, bylo zjištěno, s výjimkou objemového zastoupení pórů ve svazcích, v programu Matlab z příčných řezů kompozitů s čedičovou a uhlíkovou výztuží. Objem pórů na úrovni svazku byl odhadnut

z fotek z nanoindentace na 1%. Příklad stanovení objemu vláken ve svazku je na obrázku 4.3 a objemu pórů v kompozitu na obrázku 4.4. Získané hodnoty jsou relativní, výsledné objemové zastoupení ovlivňuje nastavení prahových hodnot. Uvažované hodnoty objemového zastoupení jednotlivých fází jsou uvedeny v tabulce 4.2. Objemové zastoupení jednotlivých fází je u všech analyzovaných kompozitů velmi podobné, což se dá odhadnout z nasnímaných příčných řezů. U kompozitu se skleněnou výztuží bylo stanovení objemového zastoupení fází znesnadněno nízkým kontrastem jeho jednotlivých fází a získané informace byly velmi zavádějící, proto byly pro objemové zastoupení fází kompozitu se skleněnou výztuží uvažovány průměrné hodnoty získané z kompozitů s čedičovou a uhlíkovou výztuží. Uvažované hodnoty takto získaného objemového zastoupení fází je sepsáno v tabulce 4.3.



Obr. 4.4 Stanovení objemu vláken ve svazku



Obr. 4.5 Stanovení objemu pórů v kompozitu

úroveň	fáze	Objemové zastoupení	
		Čedič	Uhlík
		[-]	[-]
svazek	póry	0,01	0,01
	vlákna	0,665	0,688
kompozit	póry	0,103	0,119
	svazky	0,444	0,47

Tab. 4.2 Objemové zastoupení fází kompozitů s čedičovou a uhlíkovou výztuží

úroveň	fáze	Objemové zastoupení
		sklo
		[-]
svazek	póry	0,01
	vlákna	0,667
kompozit	póry	0,111
	svazky	0,457

Tab. 4.3 Objemové zastoupení fází kompozitu se skleněnou výztuží

4.3. Měření materiálových parametrů

Měření Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla matrice a výztuže kompozitů s čedičovou a uhlíkovou výztuží bylo provedeno nanoindentací. Nanoindentace probíhala na katedře mechaniky Stavební fakulty ČVUT v Praze doc. Ing. Jiřím Němečkem, Ph.D. Materiálové parametry skleněné výztuže byly získány z literatury.

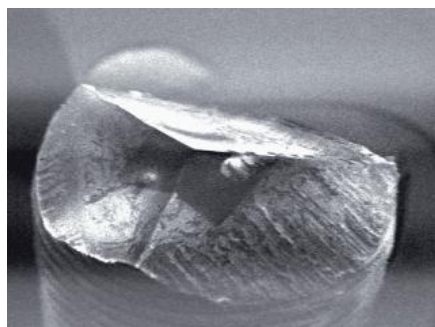
4.3.1. Nanoindentace

Nanoindentace je přímá metoda měření mikromechanických vlastností v oblasti zájmu. Spočívá v zatlačování miniaturního hrotu, kterým je většinou diamant, kolmo do povrchu zkoumaného vzorku na úrovni nanometru až mikrometru. Během měření se monitoruje závislost působící síly na hloubce vpichu. Z naměřených závislostí pak lze získat data o tvrdosti, Youngově modulu pružnosti nebo viskoelastických vlastnostech zkoumaného vzorku. V současné době je nanoindentace běžně aplikována na různé homogenní i heterogenní materiály. Numerický postup k získání materiálových parametrů je založen na zjednodušených předpokladech, jako je homogenita materiálu a jeho isotropie v testovaném objemu. Častým problémem je, že přesná mikrostruktura jednotlivých částí materiálu není náležitě analyzována, což může vést k rozdílným výsledkům získaným z různých zkoušek.

Tvary hrotů:

- sférický
- pyramidální (Berkovich)
- jehlan (Vickers)
- další

V našem případě byl použit hrot Berkovich, viz obrázek 4.5.

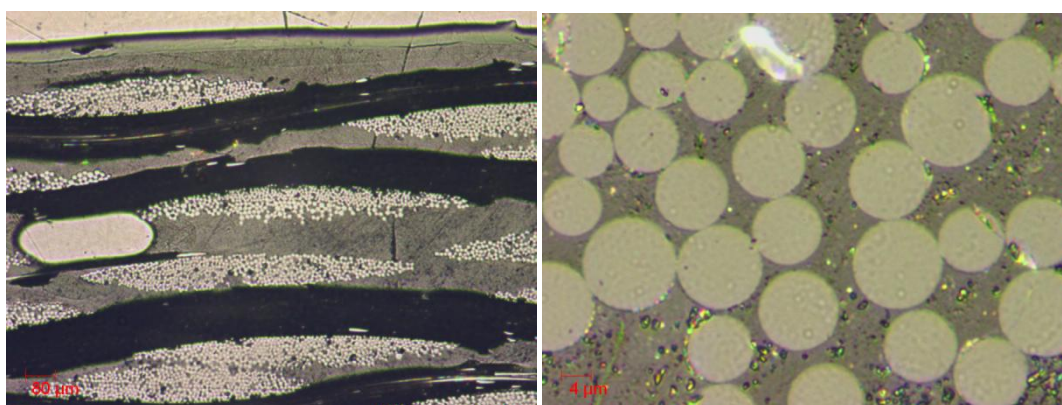


Obr. 4.6 Diamantový nanoindentační hrot typu Berkovich [36]

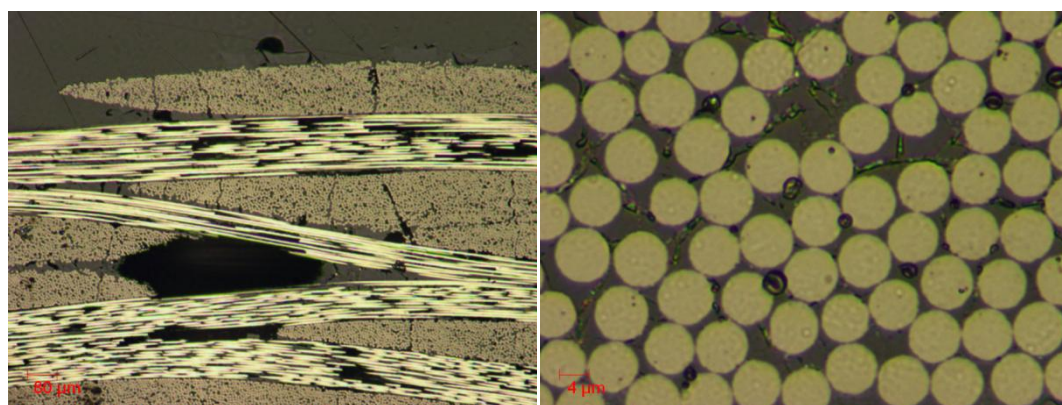
Metoda nanoindentace je blíže popsána v [37].

4.3.1.1. Vlastní měření

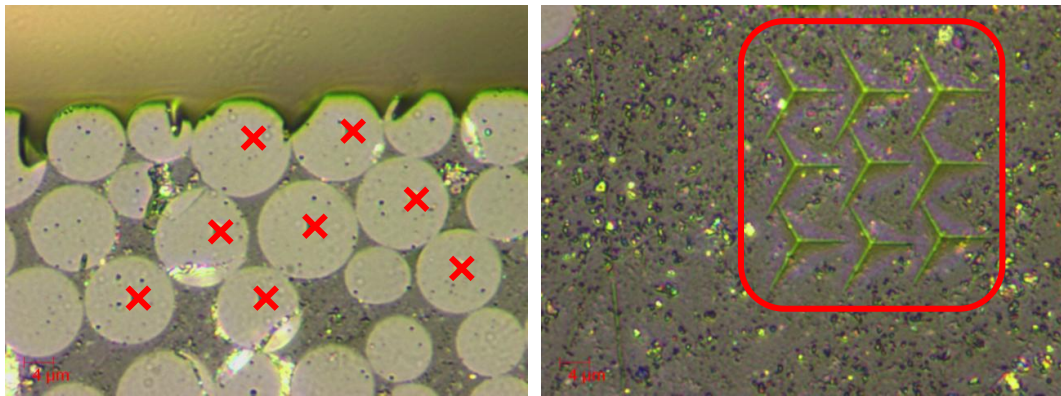
Na následujících obrázcích jsou fotografie kompozitů z nanoindentoru, na obrázcích 4.8 a 4.9 jsou naznačena místa měření.



Obr. 4.7 Kompozit s čedičovou výztuží

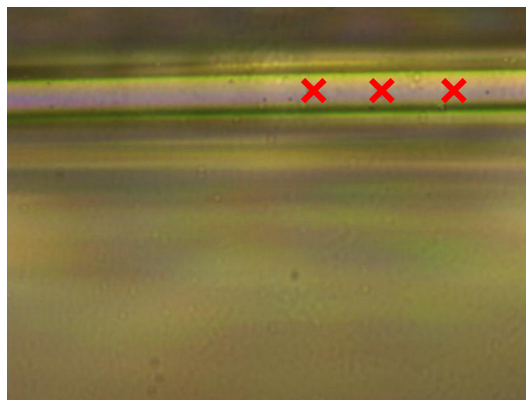


Obr. 4.8 Kompozit s uhlíkovou výztuží



a)

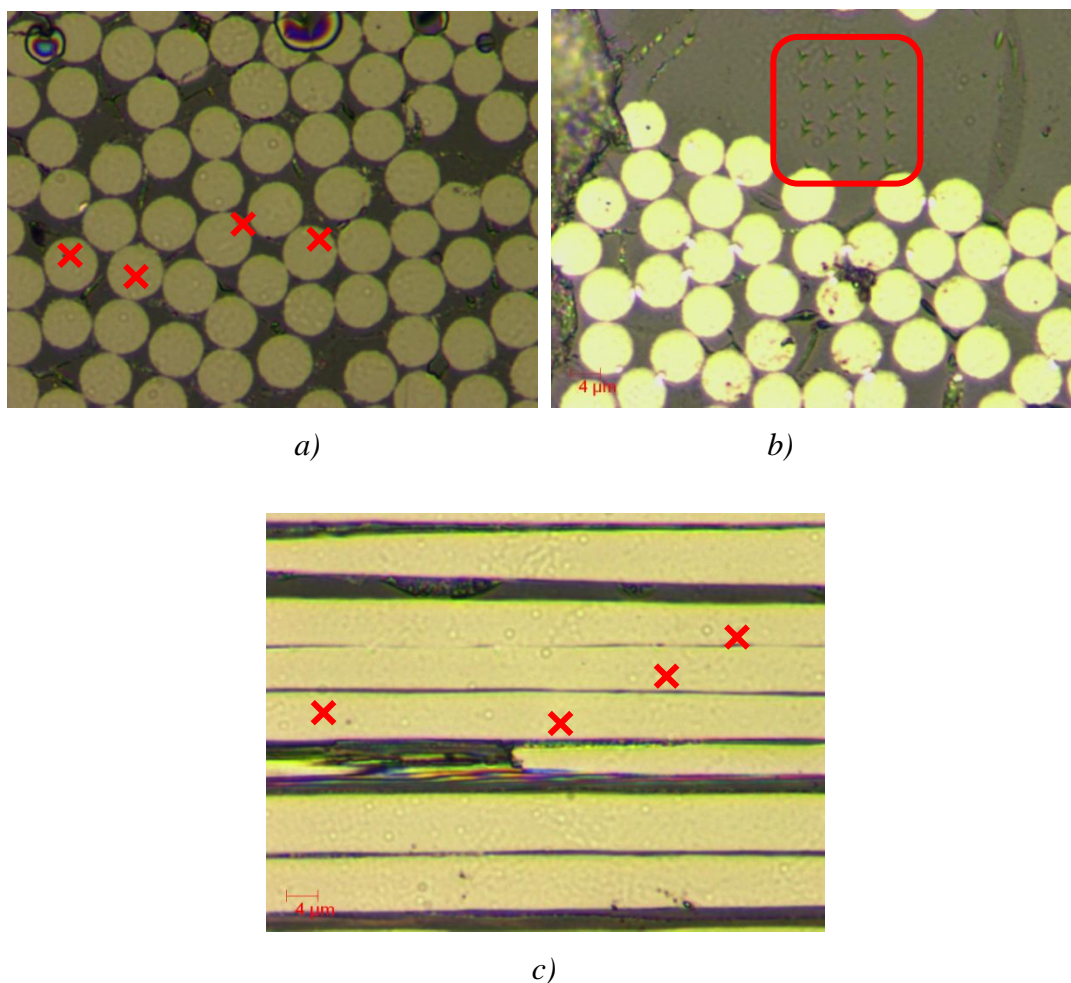
b)



c)

Obr. 4.9 Kompozit s čedičovou výztuží - místa měření:

- a) Vlákna - podélný směr
- b) Matrice
- c) Vlákna - příčný směr



Obr. 4.10 Kompozit s uhlíkovou výztuží - místa měření:

- a) Vlákna - podélný směr
- b) Matrice
- c) Vlákna - příčný směr

Výsledky z měření jsou shrnuty v tabulce 4.4 a 4.5. Uvedené hodnoty jsou průměrnými hodnotami jednotlivých měření. V těchto tabulkách jsou zároveň uvedeny hodnoty získané z literatury [38, 39, 40, 41] pro umožnění ověření důvěryhodnosti získaných parametrů. Pro kompozity se skleněnou výztuží jsou uvedeny pouze parametry získané z literatury v tabulce 4.6.

Mat. parametr	Nanoindentace			Literatura		
	Vlákna		Matrice	Vlákna		Matrice
	podélně	příčně		podélně	příčně	
E [GPa]	45,8	18,09	2,12	80	-	2,3
ν [-]	0,4	0,24	0,24	-	-	-

Tab. 4.4 Kompozit s čedičovou výztuží

Mat. parametr	Nanoindentace			Literatura		
	Vlákna		Matrice	Vlákna		Matrice
	podélně	příčně		podélně	příčně	
E [GPa]	35,95	18,49	34,58	294	12,8	2,3
ν [-]	0,4	0,24	0,24	0,24	0,4	-

Tab. 4.5 Kompozit s uhlíkovou výztuží

Mat. parametr	Literatura	
	Vlákna	
	podélně	příčně
E [GPa]	73	-
ν [-]	0,23	-

Tab. 4.6 Skleněná vlákna

Z tabulky 4.4 a 4.5 je patrné, že některé hodnoty změřené nanoindentací nekorespondují s hodnotami získanými z literatury. Důvod značného rozdílu těchto parametrů může být způsoben ovlivněním měření ostatními fázemi. V případě uhlíkového kompozitu byl k dispozici pouze vzorek vypálený při teplotě 800°C, což také dokazuje vyšší naměřená hodnota modulu pružnosti matrice. Jelikož je v této práci provedena analýza kompozitů s polymerní matricí, byly při výpočtu použity vlastnosti matrice naměřené na kompozitu s čedičovou výztuží z tabulky 4.4. Smykové moduly pružnosti byly v případě uhlíku získány z literatury [40], u čedičových vláken se hodnoty smykového modulu nejčastěji pohybovaly kolem hodnoty 25GPa, např. [41], proto byla do výpočtů uvažována tato hodnota. Jelikož jsou parametry čedičových a skleněných vláken velmi podobné, smykový modul skleněných vláken byl dopočítán tak, aby byl poměr mezi modulem pružnosti v tahu a ve smyku shodný jako u čediče, stejně tak byl dopočítán modul pružnosti v tahu v příčném směru skleněných vláken. Poissonovo číslo bylo u skleněných vláken uvažováno shodné jako u čedičových vláken. Vstupní parametry do výpočtu efektivních tuhostí jsou shrnuty v tabulce 4.7.

Materiálové parametry	Sklo		Čedič		Uhlík		Matrice
	Vlákna		Vlákna		Vlákna		
	podélně	příčně	podélně	příčně	podélně	příčně	
E [GPa]	73	16	80	18	294	12,8	2,12
G [GPa]	23	9	25	10	11,8	4,6	0,85
ν [-]	0,24	0,4	0,24	0,4	0,4	0,24	0,24

Tab. 4.7 Uvažované materiálové parametry

5. VÝPOČET EFEKTIVNÍCH ELASTICKÝCH VLASTNOSTÍ

Při řešení inženýrských úloh je potřeba považovat materiály z makroskopického hlediska za homogenní, tudíž je důležité najít způsob, jak je homogenizovat a získat tak efektivní vlastnosti, neboli makroskopické, které nahrazují složité vlastnosti mikroskopických struktur.

Při určování efektivních vlastností jsou obecně k dispozici 2 přístupy. Numerické metody, jako například metoda konečných prvků - MKP a zjednodušené analytické metody založené na mikromechanice kontinua, kam patří několik průměrovacích metod, mezi nimiž je i metoda Mori-Tanaka.

V předložené práci bude homogenizace provedena metodou Mori-Tanaka, která je jednou z nejpoužívanějších průměrovacích metod, blíže popsanou např. v [42], dále pak budou efektivní elastické vlastnosti řešeny MKP, kde je předpokládána detailní znalost mikrostruktury.

Značení v této kapitole:

- A, a ... proměnná
- \mathbf{A}, \mathbf{a} ... vektor
- \mathbf{A}, \mathbf{a} ... matice
- index r ... fáze kompozitu
- index 1 nebo m ... matrice
- indexy 2 až N nebo i ... inkluze/nehomogenity

5.1. Stanovení efektivních vlastností metodou Mori-Tanaka

Před samotným výpočtem efektivní matice tuhosti je zmíněn teoretický základ související s metodou Mori-Tanaka.

5.1.1. Průměrování

Pro stanovení efektivních vlastností je potřeba vyjádřit průměrné hodnoty napětí a deformace. Obecně pro homogenní médium o objemu V lze libovolnou veličinu zprůměrovat dle následujícího vztahu

$$\langle \mathbf{f} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{f}(x) dV . \quad (5.1)$$

Objemový průměr pole deformace v objemu V je definován jako

$$\mathbf{E} = \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}(x) dV = \frac{1}{V} \sum_{r=1}^N \int_{V_r} \boldsymbol{\varepsilon} dV = \sum_{r=1}^N \langle \boldsymbol{\varepsilon}_r \rangle \frac{V_r}{V} = \sum_{r=1}^N c_r \langle \boldsymbol{\varepsilon}_r \rangle, \quad (5.2)$$

- $\boldsymbol{\varepsilon}(x)$... pole deformace v bodě x
- c_r ... objemové zastoupení fáze r

Analogicky pole napětí

$$\boldsymbol{\Sigma} = \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \sum_{r=1}^N c_r \langle \boldsymbol{\sigma}_r \rangle, \quad (5.3)$$

- $\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle, \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle$... průměrné hodnoty napětí a deformace na mikro-úrovni, dále bude uvažováno $\langle \mathbf{y} \rangle = \mathbf{y}$, kde \mathbf{y} značí libovolnou veličinu
- $\mathbf{E}, \boldsymbol{\Sigma}$... makroskopické průměrné veličiny

Přičemž musí platit

$$\sum_{r=1}^N c_r = 1. \quad (5.4)$$

5.1.2. Vyjádření efektivní matice tuhosti

Výchozím bodem pro stanovení efektivní matice tuhosti \mathbf{L}^{ef} je rovnice (5.2).

Pro libovolnou fázi r kompozitu podle Hookeova zákona platí

$$\boldsymbol{\sigma}_r = \mathbf{L}_r \boldsymbol{\varepsilon}_r. \quad (5.5)$$

Stejně tak pro zhomogenizovaný materiál

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{L}^{ef} \mathbf{E}. \quad (5.6)$$

Dosazením (5.2) do (5.6) lze vyjádřit

$$\boldsymbol{\Sigma} = \sum_{r=1}^N c_r \mathbf{L}_r \boldsymbol{\varepsilon}_r. \quad (5.7)$$

Vztah mezi hodnotami pole deformace v jednotlivých fázích a průměrným polem deformací zhomogenizovaného materiálu, kterým je materiál na hranici zatížen, můžeme vyjádřit pomocí koncentračního faktoru \mathbf{A}_r jako

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = \mathbf{A}_r \mathbf{E}. \quad (5.8)$$

Dosazením (5.8) do (5.2) získáme

$$\mathbf{E} = \sum_{r=1}^N c_r \mathbf{A}_r \mathbf{E}. \quad (5.9)$$

Rovnice (5.9) musí být splněna v každém případě, z toho vyplývá

$$\sum_{r=1}^N c_r \mathbf{A}_r = \mathbf{I} , \text{ kde } \mathbf{I} \text{ je jednotková matice.} \quad (5.10)$$

Úpravou rovnice (5.10) získáme

$$c_m \mathbf{A}_m = \mathbf{I} - \sum_{r=2}^N c_r \mathbf{A}_r . \quad (5.11)$$

Nyní do rovnice (5.7) dosadíme rovnici (5.8)

$$\boldsymbol{\Sigma} = \sum_{r=1}^N c_r \mathbf{L}_r \mathbf{A}_r \mathbf{E} . \quad (5.12)$$

Jelikož platí rovnice (5.6), musí zároveň platit

$$\mathbf{L}^{ef} = \sum_{r=1}^N c_r \mathbf{L}_r \mathbf{A}_r , \quad \text{což je vidět díky vztahu (5.12).} \quad (5.13)$$

Součet přes všechny fáze kompozitu rozložíme na příspěvek matrice a součet příspěvků od nehomogenit.

$$\mathbf{L}^{ef} = \sum_{r=2}^N c_r \mathbf{L}_r \mathbf{A}_r + c_m \mathbf{L}_m \mathbf{A}_m . \quad (5.14)$$

Dále dosadíme (5.11) do (5.14), poté

$$\mathbf{L}^{ef} = \sum_{r=2}^N c_r \mathbf{L}_r \mathbf{A}_r + \mathbf{L}_m \left(\mathbf{I} - \sum_{r=2}^N c_r \mathbf{A}_r \right) \quad (5.15)$$

a následnou úpravou získáme vztah pro efektivní matici tuhosti ve tvaru

$$\mathbf{L}^{ef} = \mathbf{L}_m + \sum_{r=2}^N c_r (\mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m) \mathbf{A}_r . \quad (5.16)$$

Jak plyne z rovnice (5.16), závisí výsledný odhad efektivní matice tuhosti na způsobu výpočtu koncentračního faktoru \mathbf{A}_r . Jak již bylo zmíněno, v této práci se omezíme na běžně používanou průměrovací metodu Mori-Tanaka.

5.1.3. Koncentrační faktor

Při výpočtu koncentračního faktoru postupujeme následovně. Uvažujeme elipsoidální nehomogenitu (r) v neohraničeném médiu (0) s předepsanou hodnotou \mathbf{E} v nekonečnu a uvažujeme transformaci této nehomogenity podle obrázku 5.1, kde transformační veličinu $\boldsymbol{\mu}$ zavádíme tak, že

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = \mathbf{E} + \mathbf{S} \boldsymbol{\mu} . \quad (5.17)$$

Užitím Hookova zákona obdržíme identitu.

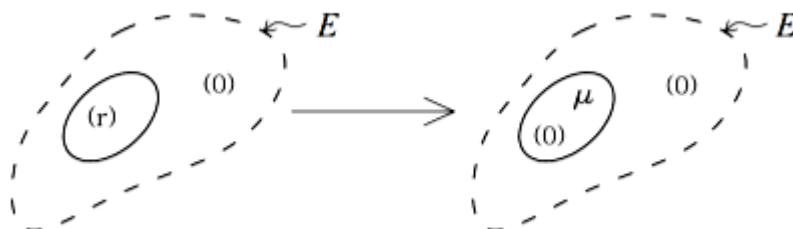
$$\boldsymbol{\sigma}_r = \mathbf{L}_r \boldsymbol{\varepsilon}_r = \mathbf{L}_m (\boldsymbol{\varepsilon}_r - \boldsymbol{\mu}) . \quad (5.18)$$

Spojením rovnic (5.18) a (5.17) dostaneme

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{L}_m^{-1}(\mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m)\boldsymbol{\varepsilon}_r, \quad (5.19)$$

$$\mathbf{E} + \mathbf{S}\boldsymbol{\mu} = \mathbf{E} + \mathbf{S}\mathbf{L}_m^{-1}(\mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m)\boldsymbol{\varepsilon}_r, \quad (5.20)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = [\mathbf{I} + \mathbf{S}\mathbf{L}_m^{-1}(\mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m)]^{-1} \mathbf{E}. \quad (5.21)$$



Obr. 5.1 Transformace nehomogenity

S uvážením rovnice 5.8 pro koncentrační faktor platí

$$\mathbf{A}_r = [\mathbf{I} + \mathbf{S}\mathbf{L}_m^{-1}(\mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m)]^{-1}, \quad (5.22)$$

kde matice \mathbf{S} se nazývá Eshelbyho tenzor.

5.1.4. Eshelbyho tenzor

Eshelbyho tenzor závisí pouze na materiálových vlastnostech matrice a na tvaru inkluzí.

V elektrické vodivosti je analogem Eshelbyho tenzoru v elasticitě depolarizační tenzor. Pro některé speciální tvary lze depolarizační tenzor pro vyjádřit analyticky [43], např.:

- Koule ($a = b = c$)

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = \frac{1}{3}$$

- Eliptický válec ($c \rightarrow \infty$)

$$S_{11} = \frac{b}{a+b}, \quad S_{22} = \frac{a}{a+b}, \quad S_{33} = 0$$

- Stěna ($b \rightarrow \infty, c \rightarrow \infty$)

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = \frac{1}{3}$$

- Tenká čočka (penny-shape) ($a = b \gg c$)

$$S_{11} = S_{22} = \frac{\pi c}{4a}, \quad S_{33} = 1 - \frac{\pi c}{2a}$$

- Zploštělý (diskovitý) sferoid (oblate spheroid) ($a = b > c$)

$$S_{11} = S_{22} = \frac{a^2 c}{2(a^2 - c^2)^{\frac{3}{2}}} \left[\arccos\left(\frac{c}{a}\right) - \frac{c}{a} \left(1 - \frac{c^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad S_{33} = 1 - 2S_{11}$$

- Protáhlý (doutníkový) sferoid (prolate spheroid) ($a = b < c$)

$$S_{11} = S_{22} = \frac{a^2 c}{2(c^2 - a^2)^{\frac{3}{2}}} \left[\frac{c}{a} \left(1 - \frac{c^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} - \operatorname{arccosh}\left(\frac{c}{a}\right) \right], \quad S_{33} = 1 - 2S_{11}$$

Jednoduše vyjádřit Eshelbyho tenzor pro některé tvary inkluzí lze i v elasticitě [44]:

- Kulové inkluze

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \frac{7-5\nu}{15(1-\nu)} & \frac{5\nu-1}{15(1-\nu)} & \frac{5\nu-1}{15(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{7-5\nu}{15(1-\nu)} & \frac{5\nu-1}{15(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{7-5\nu}{15(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{2(4-5\nu)}{15(1-\nu)} & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & & \frac{2(4-5\nu)}{15(1-\nu)} & 0 \\ & & & & & \frac{2(4-5\nu)}{15(1-\nu)} \end{bmatrix},$$

kde ν je poissonovo číslo izotropní matrice.

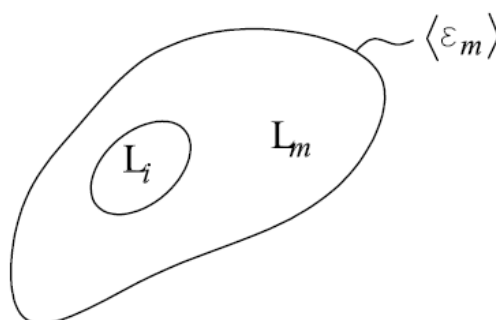
- Válcové inkluze

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{l}{2(k+m)} & \frac{3k+2m}{4(k+m)} & \frac{k-2m}{4(k+m)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{l}{2(k+m)} & \frac{k-2m}{4(k+m)} & \frac{3k+2m}{4(k+m)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k+2m}{2(k+m)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix},$$

kde konstanty k, l, m se nazývají Hillovy moduly, viz [44].

5.1.5. Metoda Mori-Tanaka

Tato metoda je vhodná pro určení efektivních vlastností heterogenních systémů se známým objemovým zastoupením jednotlivých fází bez detailní znalosti mikrostruktury. Vychází z řešení problému jedné inkluze vložené do nekonečného média [45], které je v případě řešení efektivních tuhostí na své hranici zatíženo makroskopickou deformací nebo makroskopickým napětím, viz obrázek 5.2. Jedním z předpokladů této metody je vzájemná interakce jednotlivých nehomogenit. Jedná se o metodu explicitní, která poskytuje relativně rychlé a spolehlivé odhady efektivních vlastností systémů.



Obr. 5.2 Princip metody Mori-Tanaka

V metodě Mori-Tanaka se pomocí koncentračního faktoru vyjádří vztah mezi průměrným deformačním polem fáze a matrice,

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = \mathbf{A}_r \boldsymbol{\varepsilon}_m . \quad (5.23)$$

Abychom mohli vyjádřit vztah mezi $\boldsymbol{\varepsilon}_f$ a \mathbf{E} , zavádí se další koncentrační faktor \mathbf{A}^{MT} , díky kterému můžeme psát

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = \mathbf{A}_r^{MT} \mathbf{E} . \quad (5.24)$$

Z rovnice (5.23) vyjádříme vztah pro matici,

$$\boldsymbol{\varepsilon}_m = \mathbf{A}_m \boldsymbol{\varepsilon}_m . \quad (5.25)$$

Aby byla tato rovnice splněna, musí platit

$$\mathbf{A}_m = \mathbf{I} . \quad (5.26)$$

Po dosazení (5.23) se rovnice (5.2) zapíše ve tvaru

$$\mathbf{E} = \sum_{r=1}^N c_r \mathbf{A}_r \boldsymbol{\varepsilon}_m . \quad (5.27)$$

Ze vztahu (5.27) vyjádříme $\boldsymbol{\varepsilon}_m$,

$$\boldsymbol{\varepsilon}_m = \left(\sum_{r=1}^N c_r \mathbf{A}_r \right)^{-1} \mathbf{E} = \left(c_m \mathbf{A}_m + \sum_{r=2}^N c_r \mathbf{A}_r \right)^{-1} \mathbf{E} . \quad (5.28)$$

S odkazem na (5.26) můžeme rovnici (5.28) psát

$$\boldsymbol{\varepsilon}_m = \left(c_m \mathbf{I} + \sum_{r=2}^N c_r \mathbf{A}_r \right)^{-1} \mathbf{E} . \quad (5.29)$$

Z rovnice (5.23) a (5.29) získáme

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \mathbf{A}_i \left(c_m \mathbf{I} + \sum_{r=2}^N c_r \mathbf{A}_r \right)^{-1} \mathbf{E} \quad (5.30)$$

a z rovnic (5.24) a (5.30) vyplývá vztah mezi \mathbf{A}_r^{MT} a \mathbf{A}_r ,

$$\mathbf{A}_i^{MT} = \mathbf{A}_i \left(c_m \mathbf{I} + \sum_{r=2}^N c_r \mathbf{A}_r \right)^{-1} . \quad (5.31)$$

Výsledné efektivní matice tuhosti jsou popsány následujícím vztahem

$$\mathbf{L}^{MT,ef} = \mathbf{L}_m + \sum_{r=2}^N c_r (\mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m) \mathbf{A}_r^{MT} . \quad (5.32)$$

Díky tomu, že metoda Mori-Tanaka je metoda explicitní, není výpočet příliš náročný, což je, zároveň se získáním relativně přesných výsledků, její velkou výhodou. Tato metoda je vhodná pro kompozity s jednoznačně definovanou maticí.

5.1.6. Výsledky

Efektivní tuhosti byly metodou Mori-Tanaka získány postupnou homogenizací pomocí programu vyvinutém speciálně k těmto výpočtům. V prvním kroku byla homogenizace provedena pro vlákna s maticí. Objemové zastoupení vláken se s přihlédnutím k faktu, že v další fázi přibude do celkového objemu ještě objem pórů, uvažovalo vyšší. Získaná matice tuhosti byla poté použita jako matice nová a inkluzemi se v této chvíli staly póry. Nově vzniklá matice tuhosti dále plnila funkci matice tuhosti inkluzí, kterými byly v této chvíli svazky, a matice byla původní - lukosil M130. V posledním kroku byly ještě přidány póry - získaná matice tuhosti v předchozím kroku se stala maticí tuhosti matice a póry tvořily inkluze. Výsledky získané tímto postupem jsou shrnuty v tabulce 5.1.

materiál	Ekvivalentní inkluze		Efektivní elastické vlastnosti [GPa]	
	Vlákna/svazky $c_f = 0.66/0.44$	Póry $c_v = 0.01/0.10$	E_x, E_y, E_z	G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}
Vlákno - matrice	$\infty, 1, 1$	-	54.3, 6.4, 6.4	2.7, 3.7, 3.7
Pórovitý svazek	→	$\infty, 1, 1.6$	53.8, 6.1, 6.2	2.6, 3.6, 3.6
Svazky - matrice	$\infty, 6.3, 1$	-	15.5, 15.5, 4.0	1.4, 1.6, 1.6
Pórovitý kompozit	→	3, 3, 1	12.7, 12.7, 3.2	1.2, 1.2, 1.2

Tab. 5.1 Efektivní el. vl. kompozitu s čedičovou výztuží

materiál	Ekvivalentní inkluze		Efektivní elastické vlastnosti [GPa]	
	Vlákna/svazky $c_f = 0.66/0.44$	Póry $c_v = 0.01/0.10$	E_x, E_y, E_z	G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}
Vlákno - matrice	$\infty, 1, 1$	-	203.5, 5.9, 5.9	2.2, 3.4, 3.4
Pórovitý svazek	→	$\infty, 1, 1.6$	201.5, 5.7, 5.8	2.1, 3.3, 3.3
Svazky - matrice	$\infty, 6.3, 1$	-	55.7, 55.7, 4.3	1.4, 1.6, 1.6
Pórovitý kompozit	→	3, 3, 1	40.5, 40.5, 3.3	1.2, 1.3, 1.3

Tab. 5.2 Efektivní el. vl. kompozitu s uhlíkovou výztuží

materiál	Ekvivalentní inkluze		Efektivní elastické vlastnosti [GPa]	
	Vlákna/svazky $c_f = 0.66/0.44$	Póry $c_v = 0.01/0.10$	E_x, E_y, E_z	G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}
Vlákno - matrice	$\infty, 1, 1$	-	49.6, 6.2, 6.2	2.7, 3.7, 3.7
Pórovitý svazek	→	$\infty, 1, 1.6$	49.1, 5.9, 6.0	2.5, 3.6, 3.6
Svazky - matrice	$\infty, 6.3, 1$	-	14.3, 14.3, 4.0	1.4, 1.7, 1.7
Pórovitý kompozit	→	3, 3, 1	11.7, 11.7, 3.1	1.2, 1.2, 1.2

Tab. 5.3 Efektivní el. vl. kompozitu se skleněnou výztuží

5.2. Stanovení efektivních elastických vlastností metodou konečných prvků

5.2.1. Metoda konečných prvků

Hlavním zdrojem pro popis MKP je [46]. Mezi moderními metodami napětí-ovně-deformační analýzy dnes jednoznačně dominuje numerická metoda - metoda konečných prvků. MKP je v současné době považována za nejuniverzálnější metodu pro řešení variačně formulovaných problémů fyziky souvisejících s problematikou teorie polí. K velkým přednostem MKP v oblasti mechaniky kontinua patří zejména možnost řešení úlohy pro obecný geometrický tvar tělesa, obecné zatížení a uložení i pro komplikované konstitutivní vztahy materiálu.

Metoda konečných prvků je založena na Lagrangeově principu minima potenciální energie, který říká, že ze všech kinematically přípustných stavů pružného tělesa nastává ten, který dává potenciální energii systému minimální hodnotu.

Princip MKP spočívá v diskretizaci spojitého kontinua pomocí konečných prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlech. Diskretizace musí být provedena tak, aby nikde nevznikly mezery nebo přesahy, což omezuje výběr prvků. K typickým prvkům patří

U 1-D těles

- přímkový prvek

U 2-D těles

- trojúhelníkový prvek
- čtyřúhelníkový prvek
- isoparametrický prvek

U osově symetrických těles (3-D)

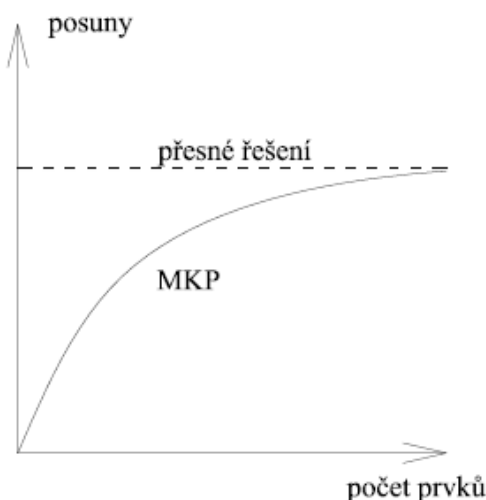
- osově symetrické prvky ve tvaru kroužků trojúhelníkového, čtyřúhelníkového resp. isoparametrického průřezu

U těles 3-D

- čtyřstěn, pětistěn, šestistěn
- isoparametrický čtyřstěn, pětistěn, šestistěn

U moderních programů MKP se diskretizace úlohy provádí automaticky.

Na volbě typu konečného prvku a zejména jeho velikosti, tedy na vytvořené konečné - prvkové síti silně závisí přesnost řešení MKP. S rostoucím počtem prvků síť dochází ke konvergenci výpočtu k přesnému řešení, ovšem je potřeba brát v úvahu i časovou náročnost výpočtů. Proto se musí najít vhodný kompromis tak, aby dosažené výsledky dostatečně přesně aproximovaly přesné řešení a zároveň časová náročnost výpočtu byla co možná nejnižší. Konvergence MKP k přesnému řešení v závislosti na počtu prvků je znázorněna na obrázku 5.3.



Obr. 5.3 Konvergence MKP k přesnému řešení

Výhodou MKP je možnost výpočtového modelování chování heterogenního materiálu. V rámci každého elementu se většinou předpokládá materiálová homogenita.

Ačkoli jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky.

5.2.2. Výsledné efektivní elastické vlastnosti

Výpočet byl proveden v programu FELN. Tento program umožňuje přímo aplikovat zatížení formou makroskopicky konstantní deformace nebo napětí. Na rozdíl od komerčních programů jsou primární neznámé flukтуаční složky pole posunutí u^* , což umožňuje jednoduše zadat periodické okrajové podmínky - shodné posuny na protějších rovinách statisticky ekvivalentní periodické jednotkové buňky.

Numerické stanovení efektivních elastických vlastností v případě jednostupňové homogenizace na mezo-úrovni, která je v této práci reprezentována statisticky ekvivalentní periodickou jednotkovou buňkou, zatíženou například makroskopicky homogenním vektorem deformace, se provádí dle

vztahů uvedených níže. Lokální pole deformace může být rozděleno na lineární homogenní složku $U_i = E_{ij}x_j$ a flukтуаční složku u_i^* . Tím obdržíme vztah

$$u_i(\mathbf{x}) = E_{ij}x_j + u_i^*(\mathbf{x}). \quad (5.33)$$

Lokální deformaci můžeme zapsat ve tvaru

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) = \mathbf{E} + \boldsymbol{\varepsilon}^*(\mathbf{x}). \quad (5.34)$$

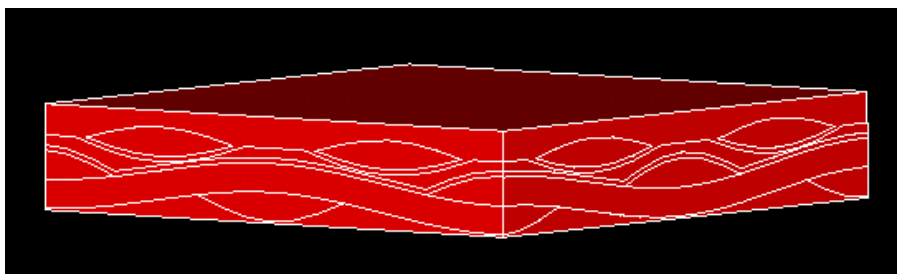
Zavedení lokálního $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x})$ a makroskopického $\boldsymbol{\Sigma}$ pole napětí umožňuje zapsat následující vztah

$$\langle \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x})^\top \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) \rangle = \mathbf{E}^\top \boldsymbol{\Sigma}, \quad (5.35)$$

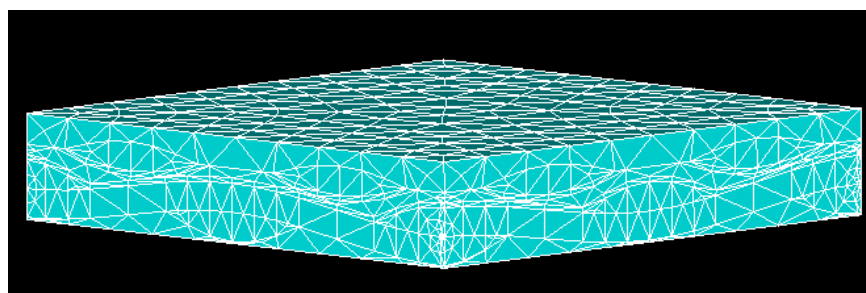
kde $\langle f \rangle$ reprezentuje objemový průměr dané veličiny f .

Na základě rovnice (5.35) lze postupně získat prvky efektivní matice tuhosti řešeného SEPUC. Pro podrobnější informace viz [31].

Efektivní tuhosti získané metodou konečných prvků jsou uvedeny v tabulce 5.4. Samotnému výpočtu předcházela tvorba modelu a konečně-prvkové sítě, viz obrázek 5.4, 5.5. Tato procedura byla provedena v programu ANSYS, který byl navržen jako univerzální generátor sítě pro co nejširší spektrum úloh.



Obr. 5.4 Model SEPUC



Obr. 5.5 Síť SEPUC

Materiál výztuže	Efektivní elastické vlastnosti [GPa]	
	E_x, E_y, E_z	G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}
Čedič	12.8, 12.8, 0.3	1.7, 0.2, 0.2
Uhlík	39.3, 39.3, 1.5	1.6, 0.7, 0.7
Sklo	8.0, 8.0, 0.7	1.2, 0.4, 0.4

Tab. 5.4 Efektivní elastické vlastnosti

5.3. Porovnání výsledků

V tabulce 5.5 a 5.6 jsou uvedeny výsledné efektivní elastické vlastnosti analyzovaných materiálů získané metodou Mori-Tanaka, metodou konečných prvků a v případě kompozitů s čedičovou a uhlíkovou textilní výztuží i experimentálním měřením.

Metoda	Efektivní Youngovy moduly pružnosti [GPa]					
	čedičová výztuž		uhlíková výztuž		skleněná výztuž	
	E_x, E_y	E_z	E_x, E_y	E_z	E_x, E_y	E_z
MT	12.7	3.2	40.5	3.3	11.7	3.1
MKP	12.8	0.3	39.3	1.5	8.0	0.7
EXP - osnova	16.3	3.8	42.2, 41.6	3.5	-	-
EXP - útek	7.9, 6.9	3.2	41.6, 47.7	3.5	-	-

Tab. 5.5 Efektivní Youngovy moduly pružnosti

Metoda	Efektivní moduly pružnosti ve smyku [GPa]					
	čedičová výztuž		uhlíková výztuž		skleněná výztuž	
	G_{xy}	G_{yz}, G_{xz}	G_{xy}	G_{yz}, G_{xz}	G_{xy}	G_{yz}, G_{xz}
MT	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2
MKP	1.7	0.2	1.6	0.7	1.2	0.4
EXP - osnova	11.5	1.7	35.9	0.7	-	-
EXP - útek	11.9	1.6, 1.8	32.5	1.2	-	-

Tab. 5.6 Efektivní moduly pružnosti ve smyku

Z tabulky 5.5 je patrné, že v rovině desky materiálu, ve které jsou i dobře měřitelné vlastnosti z pohledu experimentální metody, si hodnoty získané všemi aplikovanými metodami relativně odpovídají. V příčném směru už se pravděpodobně projevuje nekvalita vyrobených vzorků, upravená geometrie vstupující do výpočtu oproti geometrii získané optimalizací nebo obtížnost měření a tedy zkreslení výsledných hodnot získaných experimentálně, což dokazuje nepřiměřeně vysoká hodnota smykového modulu G_{xy} , zejména pro vzorky vyztužené uhlíkovou tkaninou, kde naměřená hodnota modulu G_{xy} dosahuje ve srovnání s modulem pružnosti v tahu v rovině desky nereálně vysokých hodnot, pro více detailů viz [31].

U kompozitů se skleněnou textilní výztuží je rozdíl výsledných efektivních elastických vlastností získaných metodou Mori-Tanaka a metodou konečných prvků způsoben zavedenou geometrií. Parametry získané optimalizací musely být pro snadné vytvoření modelu SEPUC poupraveny. S ohledem na zavedení relativně velkého zjednodušení je chyba, oproti pravděpodobně přesnějšimu výsledku stanovenému metodou Mori-Tanaka, přijatelná.

6. ZÁVĚR

Cílem této části diplomové práce byla tvorba vhodné statisticky ekvivalentní periodické jednotkové buňky zkoumaných materiálů, stanovení její geometrie a ověření homogenizačních postupů pro určení efektivních elastických vlastností porovnáním s experimentálním měřením.

Již dřívější zkoumání vlivu teploty, za které je analyzovaný kompozitní materiál vyroben, prokázalo, že geometrie SEPUC se vlivem této teploty příliš nemění. Tento poznatek umožnil bez zásadního ovlivnění výsledků přejít od analýzy keramických kompozitních materiálů k materiálům s polymerní maticí. Na základě tohoto faktu mohlo být a také bylo cíle dosaženo prostřednictvím kompozitů vyrobených při 200°C, tedy s polymerní maticí, na kterých bylo provedeno i experimentální měření.

Experimentální měření bylo provedeno na čtyřech vzorcích. Na dvou kompozitech s textilní čedičovou výztuží, jednom vzorku s osnovou v příčném řezu a dalším s osnovou v řezu podélném, stejně tak na kompozitu s uhlíkovou výztuží. Jelikož ale byla při výrobě kompozitu použita tkanina s přibližně shodnými vlastnostmi svazků v útku i osnově, neměly by se od sebe výsledky získané různými řezy v rámci jednoho materiálu téměř vůbec lišit, jejich chování by v rovině desky mělo být s určitou mírou tolerance téměř izotropní. Předpoklad rovinné izotropie, zavedený dále při stanovení efektivních elastických vlastností výpočtem, zcela vyvrací měření kompozitu s čedičovou textilní výztuží, u kterého se naměřené hodnoty ve směru osnovy a útku výrazně liší. Tento rozdíl naměřených elastických vlastností je pravděpodobně způsoben nízkou kvalitou vyrobených vzorků, kvalita vyrobených vzorků kompozitů s uhlíkovou výztuží byla podstatně vyšší.

Z důvodu již zmíněné nekvalitnosti měřených vzorků mohou být experimentálně získané hodnoty velmi zkreslené a ani u uhlíku, kde byly naměřené elastické vlastnosti víceméně shodné v obou měřených směrech, nelze naměřené hodnoty přijmout jako skutečné, aniž by se ověřily alespoň jednoduchým výpočtem. Stejně tak experiment doplňuje data získána výpočtem a slouží pro jejich kontrolu.

Kompozit s textilní výztuží ze skleněných vláken byl v předložené práci řešen na základě neúplných informací, které byly dohledány v literatuře či se zavedením obdobných parametrů, jako jsou parametry dvou dalších analyzovaných kompozitů. Experimentální měření tohoto kompozitu také není k dispozici. Proto výsledky uvedené v tabulce jsou pouhým dohadem. Tento kompozit již

nebude zkoumán ani v pokračující práci na tomto projektu, jelikož skleněná výztuž neodolává vysokým teplotám, při kterých se keramický kompozit vyrábí.

S uvážením všech zavedených zjednodušení při stanovování efektivních elastických vlastností vyšetřovaných kompozitů metodou Mori-Tanaka a metodou konečných prvků, je shoda se získanými hodnotami experimentálním měřením relativně velmi dobrá, a tedy počítačové modelování se v tomto případě jeví jako velmi účinný nástroj pro ušetření času i finančních prostředků.

Projekt na vypracované téma v současné době stále probíhá.

LITERATURA

I. H-KAZETY

- [1] Silike keramika, spol. s r.o. [online]. Dostupné z <http://www.silike.cz>.
- [2] Salome [online]. Dostupné z <http://www.salome-platform.org>.
- [3] OOFEM.ORG [online]. Dostupné z <http://www.oofem.org/cz/oofem.html>.
- [4] ParaView [online]. Dostupné z <http://www.paraview.org>.

II. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S KERAMICKOU MATRICÍ

- [5] TOMKOVÁ, B.: *Využití predikce vlastností kompozitů s textilní výztuží pro optimalizaci výrobního procesu*. Dostupné z <http://www.statspol.cz/request/request2006/sbornik/tomkova.pdf>.
- [6] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů [online]. Dostupné z <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecnny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>.
- [7] REJMANOVÁ, L. *Využití odpadů krátkých čedičových vláken pro kompozitní materiály*. Liberec, 2010. Diplomová práce na FT TUL. Vedoucí práce: Ing. Vladimír Kovačič. [online]. Dostupné z <http://www.kht.tul.cz/items/A-DP/dp2010/Rejmanov%C3%A11.pdf>.
- [8] RUCKÁ, M. *Povrchové vlastnosti kompozitních materiálů s pletenou čedičovou a skleněnou výztuží*. Liberec, 2009. Diplomová práce na FT TUL. Vedoucí práce: Ing. Miroslava Maršálková.
- [9] MACHEK, V., SODOMKA, J. *Polymery a kompozity s polymerní matricí*. Nauka o materiálu. 4.část. ČVUT v Praze, 2008.
- [10] BAREŠ, R. A. *Kompozitní materiály*. SNTL, Praha 1988.
- [11] VEJRAŽKOVÁ, I. *Plasty pro stavebnictví a architekturu 7 - Polymerní vláknové kompozity* [online]. Dostupné z http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-7_7_vlUoknitUn_kompozity.pdf.
- [12] HALASOVÁ, M. *Optimalizace rozhraní vlákno matrice u kompozitů s keramickou matricí*. Brno, 2011. Diplomová práce na FCH VUT v Brně. Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Chlup, Ph.D.
- [13] PZservis. *Lukosil* [online]. Dostupné z http://www.pzservis.cz/izol_projektanti2/lucebni/lukosilx.htm.

- [14] Kompozity - Definice a základní přehled kompozitních materiálů [online]. Dostupné z <http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>.
- [15] MICHLÍČEK, P. *Vliv plnění nanočásticemi na dielektrické vlastnosti elektroizolačních laků*. Brno, 2007. Diplomová práce na FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce: Ing. Helena Polsterová, CSc. [online]. Dostupné z http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16425.
- [16] KNOB, A. *Vláknové výztuže pro polymerní kompozity*. Brno, 2010. Bakalářská práce na FCH VUT v Brně. Vedoucí práce: Prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D. [online]. Dostupné z http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27154.
- [17] HORSKÁ, P. *Příprava polymerních kompozitů: Skleněné vlákno/polyesterová pryskyřice*. Brno, 2009. Bakalářská práce na FCH VUT v Brně. Vedoucí práce: Prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D. [online]. Dostupné z http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13702.
- [18] SEDLÁČEK, J. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*. Brno, 2010. Disertační práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí práce: Doc. Ing. Antonín Humár, CSc.
- [19] Škola textilu, Vazby tkanin - Úvod, základní pojmy [online]. Dostupné z <http://www.skolertextilu.cz/tkaniny/index.php?page=2>.
- [20] GRÉGR, J. *Skleněná vlákna - historie a současnost* [online]. Dostupné z <http://www.czechdesign.cz/index.php?lang=1&clanek=34&status=c>.
- [21] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity* [online]. Dostupné z <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>.
- [22] POHÁNKOVÁ, I. *Čedičová vlákna pro technické aplikace*. Liberec, 2010. Bakalářská práce na FT TUL. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Blanka Tomková, Ph.D.
- [23] Basaltex [online]. Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků. Dostupné z <http://www.basaltex.cz>.
- [24] GRÉGR, J. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. Liberec, 2004. Zpráva pro výzkumné centrum "Textil" LN00B090 na FP TUL [online]. Dostupné z http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/%5B3.1.09%5D.pdf.
- [25] OVŠÍK, J. *Studium elektrických vlastností nanokompozitů*. Brno, 2010. Bakalářská práce na FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce: Ing. Helena Polsterová, CSc.
- [26] MICHNA, Š. *Kompozitní materiály* [online]. Dostupné z http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni-materialy.pdf.

- [27] KADEŘÁBEK, L. *Vnitřní struktura kompozitů s anorganickou výztuží*. Liberec, 2010. Diplomová práce na FT TUL. Vedoucí práce: Ing. Jana Salačová, Ph.D.
- [28] SALAČOVÁ, J. *Možnosti počítačového vidění reálné struktury tkaninových kompozitů*. Liberec, 2008. Disertační práce na FT TUL. Vedoucí práce: Doc. Ing. Bohumila Košková, CSc.
- [29] URBANOVÁ, S. *Stanovení efektivních elektrických vodivostí textilních kompozitů*. Praha, 2011. Bakalářská práce na FSv ČVUT v Praze. Vedoucí práce: Prof. Ing. Michal Šejnoha, Ph.D., DSc.
- [30] ŠEJNOHA, M.; URBANOVÁ, S.; SALAČOVÁ, J.; MARŠÁLKOVÁ, M.. *Effective mechanical and transport properties of polysiloxane matrix based composites*. Prezentováno v: *High Performance Structures and Materials VI*, r.2012.
- [31] VOREL, J.; URBANOVÁ, S.; GRIPPON, E.; JANDEJSEK, J.; MARŠÁLKOVÁ, M.; ŠEJNOHA, M. *Multi-Scale Modeling of Textile Reinforced Ceramic Composites*.
- [32] HATTA, H.; TAYA, M. *Equivalent inclusion method for steady state heat conduction in composites*. International Journal of Engineering Science, 1986.
- [33] ŠEJNOHA, M. *Micromechanical modeling of heterogeneous materials and structures*. Disertační práce. Publikováno Akademií věd ČR. Praha, 2007.
- [34] ZEMAN, J. *Analysis of Composite Materials with Random Microstructure*. PhD thesis, CTU in Prague, 2003.
- [35] HILL, R. *Elastic properties of reinforced solids*. Journal of the mechanics and physics of solids, 1963.
- [36] MUNZAR, M.; ČERNOHORSKÝ, T. *Nanomateriály - Testování mechanických vlastností nanomateriálů* [online]. Dostupné z http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/chxix_4_cl1.pdf.
- [37] Měření mikromechanických vlastností - přímá metoda nanoindentace [online]. Dostupné z <http://ksm.fsv.cvut.cz/~nemecek/research/mikromechanika.pdf>.
- [38] Vlastnosti vláken - Ultimatívni mechanické chování a porušení vláken [online]. Dostupné z http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/VlastnostiVlaken-predna_ska9.pdf.
- [39] Kompozity - Charakterizace kompozitů [online]. Dostupné z <http://www.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/15%20KAPITOLA%2013.pdf>.
- [40] VOREL, J. *Multi-scale Modeling of Composite Materials*. Praha, 2009. Disertační práce na FSv ČVUT v Praze. Vedoucí práce: Prof. Ing. Michal Šejnoha, Ph.D., DSc.

- [41] ČERNÝ, M. *Pyrolyzované matrice vláknových kompozitů a jejich mechanické vlastnosti* [online]. Dostupné z http://www.csm-kompozity.wz.cz/Polyzovane_matrice.pdf.
- [42] Macro-Micro Theory on Multifield Coupling Behavior of Heterogeneous Materials, Qing-Hua Qin, Qing-Sheng Yang
- [43] HATTA, H.; TAYA, M. *Equivalent inclusion method for steady state heat conduction in composites*. International Journal of Engineering Science, 1986.
- [44] ŠEJNOHA, M.; ZEMAN, J. *Micromechanic in practice*, 2013.
- [45] ŠEJNOHA, M. Přednášky z předmětu: *Mechanika kompozitních materiálů*. ČVUT v Praze, 2010.
- [46] Základy metody konečných prvků [online]. Dostupné z http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=52476.

I. H-KAZETY

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1 Porušení H-kazety, obr. dodaný Silike</i>	12
<i>Obr. 1.2 Forma na výrobu H-kazet</i>	12
<i>Obr. 2.1 Referenční kazeta, obr. dodaný firmou Silike</i>	14
<i>Obr. 2.2 Kazeta Silike, obr. z dwg, dodáno firmou Silike</i>	14
<i>Obr. 2.3 Střed referenční kazety</i>	16
<i>Obr. 2.4 Bok kazety</i>	16
<i>Obr. 2.5 Referenční kazeta</i>	16
<i>Obr. 2.6 Kazeta Silike</i>	16
<i>Obr. 3.1 Pracovní diagram</i>	18
<i>Obr. 3.2 Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na teplotě</i>	19
<i>Obr. 3.3 Schéma podepření a zatížení</i>	21
<i>Obr. 3.4 Odezva kazet na zatěžování smykem ve vybraných krocích ve 3D</i>	24
<i>Obr. 3.5 Závislost síly na velikosti posunu kazet při zatěžování smykem</i>	25
<i>Obr. 3.6 Pracovní diagram kazet při zatěžování smykem</i>	25
<i>Obr. 3.7 Schéma podepření a zatížení</i>	26
<i>Obr. 3.8 Odezva kazet na zatěžování kroucením ve vybraných krocích</i>	28
<i>Obr. 3.9 Síla v závislosti na vertikálním posunutí daného bodu</i>	29
<i>Obr. 3.10 Průběh teploty na povrchu kazet v čase při zatížení teplotním šokem</i>	31
<i>Obr. 3.11 Poškození způsobené teplotním šokem</i>	31

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1 Objem materiálu kazet</i>	14
<i>Tab. 2.2 Parametry sítě</i>	15
<i>Tab. 3.1 Pevnost v tahu za ohybu za žáru</i>	19
<i>Tab. 3.2 Technická data</i>	20

II. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S KERAMICKOU MATRICÍ

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1 Synergický jev.....</i>	38
<i>Obr. 2.2 Druhy kompozitů podle geometrie výztuže:.....</i>	39
<i>Obr. 2.3 Závislosti doby vytvrzení lukosilu M 130 na teplotě.....</i>	42
<i>Obr. 2.4 Experimentální buňka plátňové vazby.....</i>	45
<i>Obr. 3.1 Složený obraz.....</i>	52
<i>Obr. 4.1 Idealizovaný geometrický model jednovrstvé buňky.....</i>	55
<i>Obr. 4.2 Idealizovaný geometrický model dvouvrstvé buňky.....</i>	56
<i>Obr. 4.3 Původní obrazy a binární obrazy kompozitů.....</i>	57
<i>Obr. 4.4 Stanovení objemu vláken ve svazku.....</i>	58
<i>Obr. 4.5 Stanovení objemu pórů v kompozitu.....</i>	58
<i>Obr. 4.6 Diamantový nanoindentační hrot typu Berkovich.....</i>	60
<i>Obr. 4.7 Kompozit s čedičovou výztuží.....</i>	60
<i>Obr. 4.8 Kompozit s uhlíkovou výztuží.....</i>	60
<i>Obr. 4.9 Kompozit s čedičovou výztuží - místa měření:.....</i>	61
<i>Obr. 4.10 Kompozit s uhlíkovou výztuží - místa měření:.....</i>	62
<i>Obr. 5.1 Transformace nehomogenity.....</i>	67
<i>Obr. 5.2 Princip metody Mori-Tanaka.....</i>	69
<i>Obr. 5.3 Konvergence MKP k přesnému řešení.....</i>	73
<i>Obr. 5.4 Model SEPUC.....</i>	74
<i>Obr. 5.5 Síť SEPUC.....</i>	74

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1 Důležité parametry Lukosilu M130.....</i>	42
<i>Tab. 2.2 Porovnání fyzikálních vlastností čedičových a skleněných vláken.....</i>	47
<i>Tab. 3.1 Výsledky experimentu.....</i>	54
<i>Tab. 4.1 Geometrické parametry SEPUC.....</i>	57
<i>Tab. 4.2 Objemové zastoupení fází kompozitů s čedičovou a uhlíkovou výztuží.....</i>	58
<i>Tab. 4.3 Objemové zastoupení fází kompozitu se skleněnou výztuží.....</i>	59
<i>Tab. 4.4 Kompozit s čedičovou výztuží.....</i>	62
<i>Tab. 4.5 Kompozit s uhlíkovou výztuží.....</i>	63
<i>Tab. 4.6 Skleněná vlákna.....</i>	63

<i>Tab. 4.7 Uvažované materiálové parametry</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 5.1 Efektivní el. vl. kompozitu s čedičovou výztuží.....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 5.2 Efektivní el. vl. kompozitu s uhlíkovou výztuží</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 5.3 Efektivní el. vl. kompozitu se skleněnou výztuží</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 5.4 Efektivní elastické vlastnosti</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 5.5 Efektivní Youngovy moduly pružnosti</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 5.6 Efektivní moduly pružnosti ve smyku.....</i>	<i>75</i>