



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**SIMULACE TŘÍBODOVÉHO OHYBU PĚNOVÝCH
LAMINÁTŮ**

THREE-POINT BENDING TEST OF FOAM LAMINATES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Kelecsényi

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Skalka, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Matej Kelecsényi**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Skalka, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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

Simulace tříbodového ohybu pěnových laminátů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku vzniku a šíření trhliny jádrem pěnových laminátů při zkoušce tříbodovým ohybem. Zkušební vzorek pěnového laminátu je tvořen dvěma deskami a vrstvou keramické pěny uvnitř (jádro). Keramická pěna je uvažována homogenní a je tvořena pomocí Kelvinovy buňky s otevřenou pórovitostí - předpokládá se řešení na diskrétní úrovni. Jedná se o aktuální problematiku s velkým potenciálem využití v leteckém a automobilovém průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

1. Provedení rešeršní studie související s řešenou problematikou
2. Vytvoření výpočtového modelu pěnového laminátu
3. Provedení studie šíření trhliny v pěnovém laminátu při zkoušce tříbodovým ohybem
4. Analýza dosažených výsledků a učinění závěrů

Seznam literatury:

Gibson, Lorna J., Ashby, Michael F. (1997): Cellular Solids - Structure and properties, Cambridge University Press

Carter, C. Barry., Norton, M. Grant. (2013): Ceramics Materials - Science and Engineering, Springer Science

Nemat-Nasser, Sia., Hori, Muneo. (1998): Micromechanics - overall properties of heterogeneous materials

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou vzniku a šírenia poruchy trámikov jadra kompozitu, z keramickej peny s homogénnou štruktúrou, tvorenou pomocou Kelvinovej bunky s otvorenou pórovitosťou, pri namáhaní trojbodovým ohybom. Pri riešení vytvorenia výpočtového modelu vzorky kompozitu, rovnako ako výpočtu zaťaženia vzorky, bola využitá metóda konečných prvkov softvéru ANSYS. Výstupmi práce sú, hodnoty reakčnej sily vzorky a prvého hlavného napätia na trámikoch penového jadra vzorky, získané pri zaťažení tejto vzorky penového kompozitu. Analýzou porušení štruktúry jadra kompozitu bola vyvodená oblasť porušených trámikov. V závere práce boli zhodnotené dosiahnuté výsledky.

Kľúčové slová

penová štruktúra s otvorenou pórovitosťou, Kelvinova bunka, MKP, ANSYS, trojbodový ohyb, keramika, penový laminát

Abstract

The bachelor thesis deals with the formation and the spread of disorder of crossbeams in core of composite, in ceramic foam with homogeneous structure formed by Kelvin cells with open porosity loaded by three-point bending test. The method of finite element in software ANSYS was used for the creation of composite sample calculation model as well as in calculation of sample loads. The results of the thesis are the values of the sample reaction force and of the first main tension on crossbeams of foam core sample obtained by loading of the foam composite sample. The area of breaches crossbeams was inferred from the analysis of composite core structure breach. In conclusion were evaluated the results obtained in this thesis.

Keywords

foam structure with open porosity, Kelvin cell, FEM, ANSYS, three-point bending, ceramics, laminate made of foam

Bibliografická citácia

KELECSÉNYI M., *Simulácia trojbodového ohybu penových laminátov*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 40 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Petr Skalka, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že táto práca je mojim dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Petra Skalku, Ph.D. a využil som pri tom literatúru uvedenú v zozname zdrojov. Bakalárska práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty strojního inžénýrství VUT v Brně a môže byť využitá ku komerčným účelom len so súhlasom vedúceho práce a dekana FSI VUT v Brně.

V Brne dňa 26. mája 2016

Matej Kelecsényi

Pod'akovanie

Pod'akovanie v prvom rade patrí vedúcemu práce, Ing. Petrovi Skalkovi, Ph.D., za odborný dohľad a vedenie pri tvorbe práce. Ďalej samozrejme mojej rodine a všetkým, ktorí ma podporovali.

Obsah

Úvod	11
1 Formulácia problematiky	13
2 Ciele práce.....	14
3 Rešeršná štúdia.....	15
3.1 Kompozitné materiály	15
3.1.1 Laminované kompozitné materiály	16
3.1.2 Kompozitné keramiky	16
3.2 Všeobecná charakteristika keramiky.....	16
3.2.1 Elastické charakteristiky.....	17
3.2.2 Plastické charakteristiky	17
3.2.3 Tvrdosť keramiky	18
3.2.4 Lomová húževnatosť keramiky	18
3.2.5 Pevnosť keramiky	18
3.3 Trojbodový ohyb.....	19
3.4 Porézne keramické materiály	19
3.4.1 Štruktúra a delenie poréznych materiálov	19
3.4.2 Využitie poréznych keramických materiálov	23
4 Analýza problému	24
5 Výpočtové modelovanie	25
5.1 Model geometrie.....	25
5.1.1 Model geometrie vzorky laminátu.....	25
5.2 Model materiálových vlastností.....	27
5.2.1 Model materiálových vlastností penového jadra	27
5.2.2 Model materiálových vlastností dosiek	27
5.3 Model okrajových podmienok	28
5.4 Model zaťaženia	29
6 Realizácia algoritmu riešenia	30
7 Prezentácia a analýza výsledkov	31
7.1 Oblasti porušovaných trémikov jadra skúšobnej vzorky laminátu.....	31
7.2 Zhodnotenie porušenia štruktúry skúšobnej vzorky laminátu	32
7.3 Prezentácia výstupov numerického riešenia	32
7.4 Prezentácia modelu vzorky po porušení štruktúry	33
Záver	35

Použité literárne a informačné zdroje.....	37
Zoznam použitých symbolov a skratiek.....	39
Zoznam použitých obrázkov	40
Zoznam použitých tabuliek	40

Úvod

V automobilovom a leteckom priemysle boli vždy na konštrukčné materiály kladené vysoké nároky najmä na pevnostné a hmotnostné parametre, ktoré spolu úzko súvisia. Prelomovými sa stali keramické materiály, avšak zatiaľ nie ako materiály konštrukčné. Vyznačujú sa vysokými pevnosťami, nízkou teplotnou rozťažnosťou a vysokou tepelnoizolačnou schopnosťou. Keramické materiály s poréznu štruktúrou, ktorým sa práca zaoberá, sa ďalej vyznačujú nízkou relatívnou hmotnosťou, spôsobenou ich penovou štruktúrou. Vlastnosti týchto materiálov sú vyhľadávané s vysokým potenciálom využitia v rôznych sférach a odvetviach strojného inžinierstva.

V úvodných kapitolách je formulovaná problematika, ciele práce a literárna štúdia, ktorá zahŕňa definovanie a základné rozdelenie kompozitných materiálov, podrobnejšie je zameraná na materiály s poréznu štruktúrou, ich vlastnosti, špecifikácie a využitie. V tejto časti je taktiež opísaná skúška trojbodovým ohybom. Ďalej sa práca zameriava na vytvorenie výpočtového modelu skúmanej vzorky penového laminátu, ktorý je tvorený dvoma doskami a vrstvou keramickej peny tvoriacou jadro, umiestnené medzi nimi. Keramická pena má homogénnu štruktúru a základ tvorí Kelvinova bunka s otvorenou pórovitosťou.

Hlavným zameraním práce je zistenie spôsobu porušovania tohto kompozitného materiálu pri zaťažení trojbodovým ohybom. Pri tvorbe modelu bola využitá metóda konečných prvkov v programe ANSYS. V závere práce sú prezentované a analyzované výsledky výpočtového modelovania a zobrazenie výsledného poškodenia modelu vzorky.

1 Formulácia problematiky

Všeobecne keramické materiály vykazujú vlastnosti vysokej pevnosti a tuhosti, no nedokážu odolávať veľkému mechanickému namáhaniu. Keramický penový materiál s otvorenou pórovitosťou, obsahuje veľký podiel pórovitosti v štruktúre a je veľmi náchylný na mechanické namáhanie a preto pri vyšších hodnotách deformácie okamžite praská, teda dochádza k lomu na jednotlivých trámikoch štruktúry. Na základe tejto experimentálne overenej skutočnosti bol výpočtový model diskkrétnej štruktúry riešený s podmienkou malých deformácii.

Je ťažké predpokladať, ako sa materiál bude správať pri namáhaní. Preto je potrebné dôkladne analyzovať správanie sa štruktúr týchto materiálov pri zaťažení, k čomu sa využívajú skúšky štvorbodovým a trojbodovým ohybom. V práci bol využitý trojbodový ohyb, aplikovaný ako deformačné zaťaženie modelu vzorky, definované posuvom.

Samotné vytvorenie výpočtového modelu vzorky kompozitu pomocou MKP je náročné, a jeho riešenie vyžaduje dlhý výpočtový čas, pričom sú kladené vysoké nároky na hardvér výpočtového zariadenia.

2 Ciele práce

Cieľom tejto bakalárskej práce je vytvoriť výpočtový model penového laminátu, tvoreného keramickou penou – jadro, a okrajovými doskami. Kelvinove bunky s otvorenou pórovitosťou, tvoria homogénnu štruktúru tohto penového jadra. Následne, je cieľom realizovať štúdiu porušenia jadra penového laminátu pri skúške trojbodovým ohybom. Dosiahnuté výsledky analyzovať, objektívne zhodnotiť a vyniesť záver.

3 Rešeršná štúdia

3.1 Kompozitné materiály

Kompozity sú tvorené z dvoch alebo viacerých materiálov odlišných vlastností. Na rozdiel od kovových zliatin, materiály kompozitu zostávajú odlišné na makroskopickej úrovni. Väčšina inžinierskych kompozitov sa skladá z dvoch materiálov: výstuž a matrica. Výstuž zaisťuje tuhosť a pevnosť, zatiaľ čo matrica drží materiál pohromade a slúži k prenosu zaťaženia medzi nespojitými výstuhami – disperziou. Najbežnejšími výstuhami sú kontinuálne vlákna, priame alebo tkané, krátke alebo časticové.

Delenie kompozitných materiálov, podľa typu disperzie, ich člení na kompozity:

- prvého druhu (pevná fáza disperzie – častice z materiálu odlišných vlastností)
- druhého druhu (kvapalná fáza disperzie – polotekutá forma výplne štruktúry)
- tretieho druhu (plynná fáza disperzie – plyn tvoriaci pórovitosť štruktúry)

Kompozity tretieho druhu je možné ďalej deliť na penové hmoty, kam patria penoplasty, kovové peny a penové keramiky.

Kovy a iné tradičné strojárské materiály sú jednotné alebo izotropné. To znamená, že vlastnosti materiálu, ako pevnosť, tuhosť a tepelná vodivosť sú nezávislé na umiestnení materiálu v súradnom systéme zaťaženia. Diskontinuálny charakter kompozitných výstuh ale znamená, že materiálové vlastnosti sa môžu líšiť v závislosti od polohy súradného systému. Napríklad, epoxidové živice tvoriace matricu, vystužené grafitovými vláknami majú vysokú pevnosť a tuhosť v smere vlákien, ale veľmi nízku v smere naprieč vláknami.

Jediná vrstva z kompozitného materiálu vyžaduje štyri konštanty pre určenie celkového namáhania materiálu. Youngov modul E_1 (v smere vlákien) a E_2 (naprieč vláknami), Poissonova konštanta μ_{12} nazývaná aj hlavný – majoritný Poissonov pomer a taktiež modul pružnosti v šmyku G_{12} .

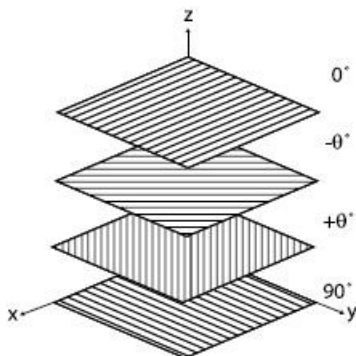
Piatu konštantu, minoritný Poissonov pomer μ_{21} sa určí zo známych vlastností pomocou vzťahu (3.1):

$$\frac{\mu_{12}}{E_1} = \frac{\mu_{21}}{E_2} \quad (3.1)$$

Pre kompozitné materiály je charakteristickým znakom synergizmus – niektoré hodnoty vlastností kompozitu môžu byť vyššie, než by odpovedalo pomernému súčtu vlastností jednotlivých zložiek na základe objemového podielu. [9]

3.1.1 Laminované kompozitné materiály

Pre zlepšenie vlastností v priečnom smere sú laminované kompozity štruktúrované uložením skladby vlákien tak, aby došlo k anulovaniu nežiadúcich vlastností a to tým, že pri každej vrstve je zvolený iný smer vlákien, ako na predchádzajúcej, viď obrázok 3.1.



Obrázok 3.1 – schéma spevňovacieho vrstvenia vláknového laminátu

S ohľadom na to, že odvodenie akýchkoľvek vzťahov pre analytické riešenie kompozitných štruktúr je náročné (možné odvodiť len pre jednoduché zaťaženia a okrajové podmienky), využívajú sa riešenia numerickými metódami. [18]

3.1.2 Kompozitné keramiky

Táto podmnožina kompozitov môže byť tvorená rôznymi skupinami materiálov. Práca sa zameriava na kompozit skladajúci sa z jadra, tvoreného keramikou penou uloženou medzi doskami, čo vedie na takzvané sendvičové uloženie laminátu.

3.2 Všeobecná charakteristika keramiky

Keramika je anorganický nekovový materiál s heterogénnou štruktúrou, tvorenou kryštalickými látkami s rôznym zložením a usporiadaním, ktoré obsahujú obvykle väčšie alebo menšie množstvo pórov.

Konstruktívne keramické materiály sa líšia od tradičnej keramiky predovšetkým chemickou a fyzikálnou homogénnosťou, vlastnosťami a typom väzby. Ide o látky kryštalické s amorfnou sklenou fázou, vzniknutou roztavením taviva a sklo tvoriacich látok, pričom častice v štruktúre sú viazané silnými väzbami (iónové a kovalentné) a v štruktúre prevládajú zložité mriežky – kubické a hexagonálne. Silné väzby spôsobujú podstatu krehkosti keramických materiálov. Väzby kovalentné sú pevné a vysoko smerové, čo zabráňuje deformáciám pomocou pohybu dislokácií. [15]

Keramické materiály majú výhodné vlastnosti, dobrú chemickú odolnosť, pri teplotnom zaťažení vysokú teplotu topenia a malý teplotný creep, nízku tepelnú a elektrickú vodivosť, vysokú tvrdosť a pevnosť v tlaku. Najväčšou nevýhodou je ich krehkosť a veľmi obťažná opracovateľnosť. Taktiež sú citlivé na defekty v štruktúre. [11, 12, 13]

3.2.1 Elastické charakteristiky

Pri krátkodobom zaťažení za optimálnych podmienok sa keramika správa ako lineárne pružný materiál. Pomerné deformácie sú priamoúmerné napätiu – Hookovské správanie. Dochádza ku skracovaniu alebo predlžovaniu pôvodných rozmerov telesa – vzťahy (3.2-3.4):

$$\varepsilon_x = [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]/E \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_y = [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]/E \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_z = [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]/E \quad (3.4)$$

ε – pomerné pretvorenie [-]

σ – napätie v osi súr. systému podľa prislúchajúceho indexu [MPa]

μ – Poissonove číslo (súčiniteľ priečnej kontrakcie) [-]

E – modul pružnosti materiálu v ťahu [MPa; GPa]

Modul pružnosti v ťahu E sa u väčšiny keramických materiálov pohybuje medzi 70 GPa (porcelán) a 48 GPa (lisovaný SiC). Existujú však materiály s vyššími hodnotami (spekané karbidy, TiC) a taktiež s nižšími (porézna keramika pre tepelné izolácie). S rastúcou teplotou modul pružnosti v ťahu mierne klesá. Poissonove číslo μ nadobúda hodnoty 0,17 až 0,36. Na výsledný modul pružnosti má vplyv nielen chemické zloženie, ale najmä mikroštruktúra (typy, podiely a vzájomné usporiadanie jednotlivých fáz v štruktúre). Závislosť modulu pružnosti dvojfázového systému, kde jedna z fáz je tvorená pórmí, určíme vzťahom (3.5): [12]

$$E = E_0(1 - aV_p + bV_p^2) \quad (3.5)$$

E_0 – modul pružnosti hutného materiálu (bez pórov)

V_p – objemový podiel pórov

a, b – konštanty závisiace na tvare póru

Z uvedeného vzťahu vyplýva, že pri objemovom podiele pórov $V_p = 0,5$ by modul pružnosti klesol približne na $\frac{1}{4}$, čo svedčí o výraznom vplyve pórovistosti na vlastnosti materiálu. [11, 12]

3.2.2 Plastické charakteristiky

Najviac zisťovanou veličinou, ktorá charakterizuje nepružné správanie (plasticitu) keramiky je tvrdosť a to za normálnych i za zvýšených teplôt.

Za studena sa keramické štruktúry správajú ako tvrdý a krehký materiál.

K trvalým zmenám tvaru dochádza len v mikroobjemoch pri značne koncentrovanom napätí. Avšak využitie keramických materiálov je naopak v podmienkach, kde sa teploty pohybujú od 1000 °C vyššie. V takýchto prípadoch sú prejavy nevratného deformovania pri zaťažení zreteľnejšie. Môže dochádzať k pomalému tečeniu materiálu – tzv. creepu, ktorý je uľahčovaný prítomnosťou pórov a dutín v štruktúre.

3.2.3 Tvrdosť keramiky

Tvrdosť je definovaná ako odpor materiálu proti vnikaniu cudzieho telesa do štruktúry materiálu. Celkovo tvrdosť, je u keramických materiálov veľmi vysoká a závisí na kryštálovej mriežke, type a hustote väzieb, veľkosti zŕn, veľkosti a type defektov v štruktúre. Podľa Mohsovej stupnice zaujíma miesto medzi najtvrdšími materiálmi, napr. neoxidovaná keramika – stupeň 9 až 9,5 z 10, ktorý obsadzuje diamant. [12]

Dôvodom vysokej tvrdosti je nízka hustota a zlá pohyblivosť dislokácii spomínaná v podkapitole 3.2.

3.2.4 Lomová húževnatosť keramiky

Keramické materiály vzhľadom k ich iontovo-kovalentným väzbám majú nízku lomovú húževnatosť, ktorá je definovaná ako odolnosť voči rastu trhlín. Typickým lomom v keramických materiáloch je lom krehký (štíepny lom, alebo lom nestabilný).

Lomové správanie keramických materiálov sa delí na:

- úplne krehké – nie sú schopné plastickej deformácie
- polokrehké – sú schopné obmedzene sa plastickey deformovať
- húževnaté – do tejto skupiny nie je možné zaradiť žiaden keramický materiál

Klasická rázová skúška nie je pre keramiku vhodná, preto krehkosť vyjadrujeme hodnotou lomovej húževnatosti K_{IC} . Lom nastáva v okamihu dosiahnutia kritickej hodnoty pri zaťažení.

3.2.5 Pevnosť keramiky

U keramických materiálov neexistuje len jedna hodnota pevnosti. Hodnoty sa líšia v závislosti na metóde, pomocou ktorej boli zmerané. Taktiež závisia na teplote – je všeobecne známe, že pevnosť klesá s rastúcou teplotou.

Hodnoty pevností keramických materiálov sa však pohybujú v širokom pásme, od 10MPa v ťahu až po 1000MPa u špeciálnych keramických materiálov.

Pevnosť v ohybe je pre túto prácu najdôležitejšia. Značne závisí na veľkosti defektov v štruktúre materiálu. Skúška, pre zistenie pevnosti v ohybe prebieha v dvoch verziách, a to v trojbodovom a štvorbodovom ohybe. Ohybová pevnosť je všeobecne daná vzťahom (3.6):

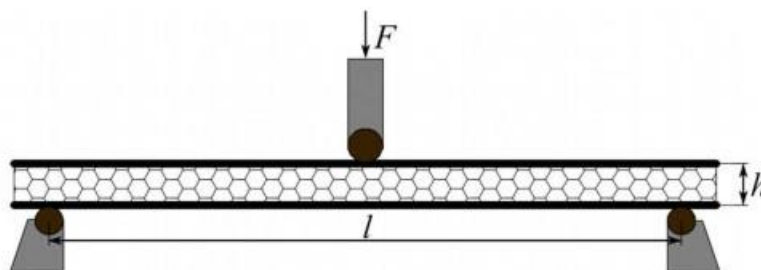
$$\sigma = \frac{M \cdot c}{J_y} \quad (3.6)$$

kde M [Nm] je ohybový moment, c [mm] vzdialenosť neutrálnej osi k ťahovému povrchu a J_y [mm⁴] modul prierezu v ohybe.

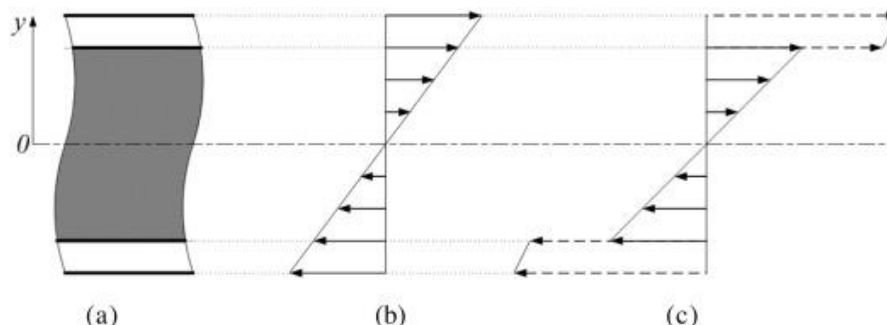
Pevnosť v tlaku je pomerne vysoká, pretože povrchové trhliny na ňu nemajú taký vplyv, ako na ohyb. [11, 12, 13, 14]

3.3 Trojbodový ohyb

Patrí medzi širokú škálu materiálových skúšok, kde sa radí k skúškam statickým. Podstatou je zaťaženie vzorky v jej strede (osi symetrie) statickou silou, pričom skúšobné teleso – vzorka je uložená na dvoch statických podporách, ideálne v určitej vzdialenosti od okraja vzorky (obrázok 3.2). Je niekoľko spôsobov zaťažovania skúšobnej vzorky trojbodovým ohybom. Pre hľadané parametre bol v práci zvolený variant, kde zaťaženie silou prebieha do momentu, kedy maximálne napätie prekročí hodnotu dovolenú (obrázok 3.3). Začína iniciácia a následné šírenie porušenia, ktoré ďalej vzniká samovoľne – bez ďalšieho nárastu zaťaženia. Šírenie porušenia sa zastaví v momente, kedy napätie opäť klesne pod kritickú hodnotu, alebo dôjde k fatálnemu porušeniu vzorky – totálnej delaminácii.



Obrázok 3.2 – schéma trojbodového ohybu sendvičového kompozitu [16]



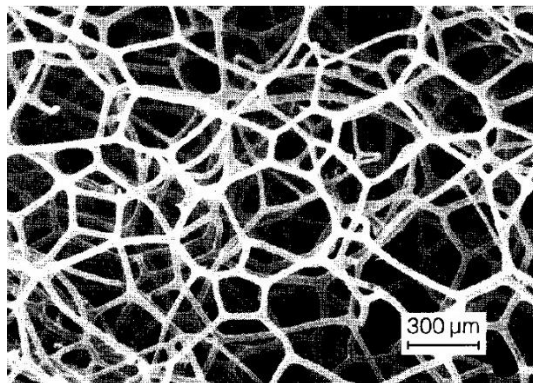
Obrázok 3.3 – a) schéma sendvičového kompozitu, b) rozloženie namáhania, c) rozloženie napätia

3.4 Porézne keramické materiály

3.4.1 Štruktúra a delenie poréznych materiálov

Porézne materiály sa vyskytujú bežne v prírode, kde sú výsledkom pomalejšej evolúcie. Výborným príkladom sú pemza, kosti, prípadne morské koralý (obrázok 3.4). Keďže sa na Zemi táto štruktúra vyskytuje už veľmi dlhú dobu, dá sa predpokladať, že vykazuje isté vlastnosti, ktoré iné štruktúry nedosahujú (najmä pri zaťažení na tlak, teplotu, atď.). V modernom priemysle sa na tieto štruktúry aplikovali hutné materiály. V poslednom období,

aspoň v určitých oblastiach strojného priemyslu sa nahradzujú odľahčenými poréznymi materiálmi, najmä vďaka výhodnému pomeru tvrdosti, pevnosti a hmotnosti. [2, 3]

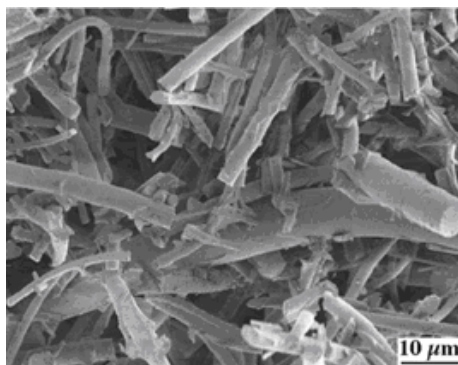


Obrázok 3.4 – porézny štruktúry morskej hubky [3]

Umelo vytvárané porézne materiály sa skladajú z bunky, póru a materiálu, ktorý tvorí nosnú časť. Tieto materiály sa delia podľa niekoľkých kritérií. [3]

Z hľadiska tejto práce sú dôležité nasledujúce rozdelenia poréznych materiálov. Podľa typu mikroštruktúry je možné porézne materiály deliť na vláknové a penové materiály. Mikroštruktúra vláknového materiálu je tvorená navzájom spojenými vláknami nosného materiálu tvoriace sieť, ktorá nevykazuje usporiadaný charakter.

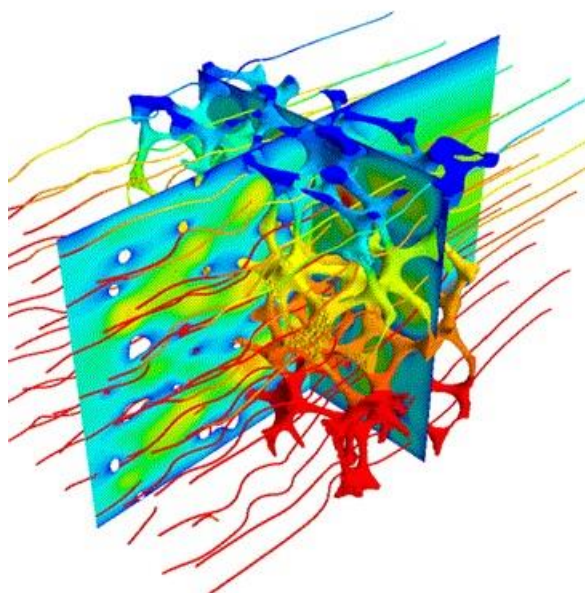
Príkladom sú izolačné dosky na raketoplánoch (obrázok 3.5), poskytujúce tepelnú izoláciu pri zahrievaní vplyvom trenia po vstupe do atmosféry.



Obrázok 3.5 – mikroštruktúra izolačnej keramickej dosky raketoplánu v vláknami z SiO_2 [4]

Druhú skupinu tvoria keramické peny. Pokiaľ sa keramický materiál, z ktorého je pena vytvorená, vyskytuje len v okrajoch buniek, jedná sa o penu s otvorenou pórovitosťou. Keramické materiály s otvorenou pórovitosťou neobsahujú blany medzi pórmí – štruktúra je tvorená vzájomne prepojenými pórmí – materiál sa stáva pre plyny či nízko viskózne kvapaliny priechodný, v závislosti na veľkosti bunky a pórov, viď obrázok 3.6. Ak sú však jednotlivé bunky od seba navzájom oddelené, ide o penu s uzavretou pórovitosťou. Tú je možné si predstaviť ako sieť mydlových bublín.

Keramické peny vykazujú izotropné správanie¹ na rozdiel od anizotropného správania sa u vláknových poréznych materiálov. [16]



Obrázok 3.6 – numerická simulácia prúdenia a prenosu tepla (CFD) v štruktúre kovovej peny s otvorenou pórovitosťou [7]

Celkovú pórovitosť je možné vypočítať zo vzťahu (3.7 a 3.8): [3]

$$\varphi = 1 - \rho_r \quad (3.7)$$

Kde $\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0}$ je relatívna hustota (3.8)

ρ je objemová hmotnosť (g/cm³)

ρ_0 je teoretická hustota matrice alebo skeletu (g/cm³)

Celková pórovitosť je súčtom otvorenej a uzatvorenej pórovitosti a je možné ju získať mikroskopickou obrazovou analýzou, prípadne výpočtom z výsledkov dvojitého váženia (Archimedova metóda), pokiaľ je známa teoretická hustota.

Celulárne materiály sú vysoko porézne materiály s hodnotou celkovej pórovitosti $\varphi > 70\%$ (peny s otvorenou/uzatvorenou bunkovou štruktúrou, s pravidelným alebo náhodným priestorovým usporiadaním), viď vzťahy (3.9 a 3.10).

pena s otvorenou bunkovou štruktúrou: $\rho_r \approx \left(\frac{t}{L}\right)^2$ (3.9)

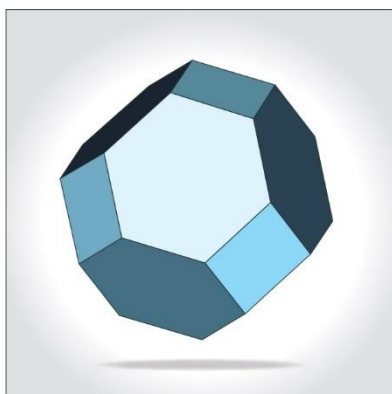
pena s uzatvorenou bunkovou štruktúrou: $\rho_r \approx \left(\frac{t}{L}\right)$ (3.10)

Prístup Gibson-Ashbyho teórie (spojujúci prístup jednotkových buniek s rozmerovou analýzou) → relatívne hustoty, kde sa štruktúra skladá z hrán a stien hrúbky t s dĺžkou L .

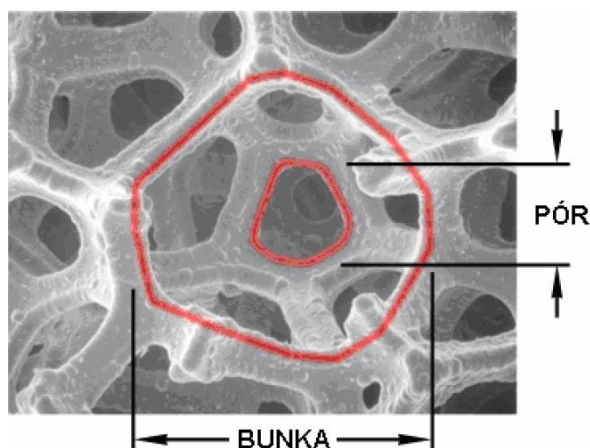
¹ Izotropné správanie, alebo izotropný materiál je definovaný ako materiál, ktorého mechanicko-fyzikálne vlastnosti sú rovnaké v každom smere.

Konštanty úmernosti závisia na tvare bunky (kubická, rhombická, dodekaedrická (dvanásťstenná), tetrakaidekaedrická alebo Gibson-Ashbyho jednotková bunka, v ktorej aj ťahové namáhanie vedie lokálne, to je na mikroštruktúrnej úrovni, k ohybovej deformácii). Pri reálnych štruktúrach dochádza k porušeniu homogenity, napr. akumuláciou pevnej fázy, teda idealizované modelové vzťahy prestávajú platiť.

Mnohé keramické peny majú štruktúru postavenú na bunke s priemerným počtom plôch 14, pričom každá z nich má priemerný počet hrán 5, čo odpovedá tetrakaidekaedrickému modelu – Kelvinova bunka (obrázok 3.7 a 3.8). [6]

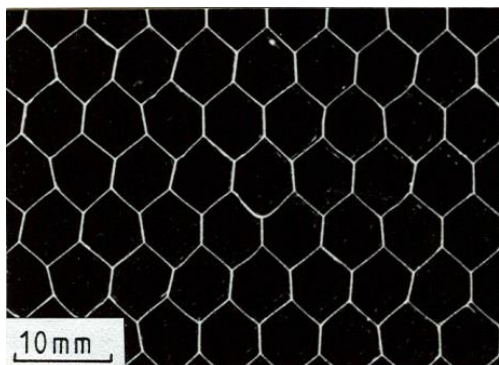


Obrázok 3.7 – model tetrakaidekaedru – Kelvinova bunka [10]

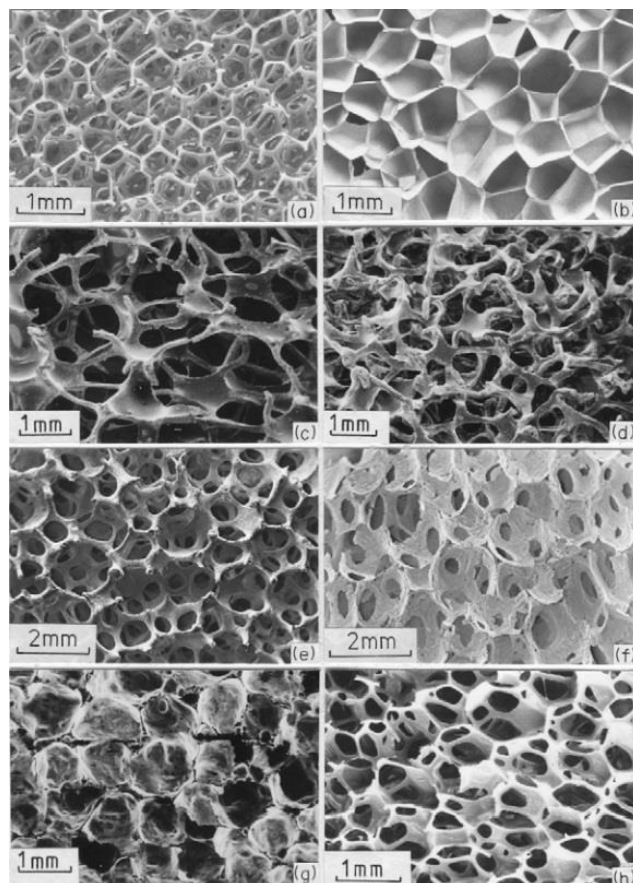


Obrázok 3.8 – reálna štruktúra s otvorenou pórovitosťou [5]

Podľa tvaru póru sú materiály delené na dve skupiny: keramické materiály s pravidelnou mriežkou (tzv. honeycomby) a peny, viď obrázok 3.9 a 3.10. [3]



Obrázok 3.9 – štruktúra s pravidelnou mriežkou – honeycomb [10]



Obrázok 3.10 – polyuretán a) štruktúra s otvorenou pórovitosťou, b) štruktúra s uzavretou pórovitosťou, c) nikel, d) meď, e) zirkón, f) mulit – porcelán, g) sklo, h) kombinovaná štruktúra – polyéterová pena [10]

3.4.2 Využitie poréznych keramických materiálov

Porézne materiály sú využívané v priemysle najmä k zníženiu hmotnosti štruktúr a konštrukcií, kde majú požadované vlastnosti vysokej pevnosti a tuhosti. Pri porovnávaní s hutnými materiálmi, ktoré nahrádzajú, má porézna a penová keramika relatívne vysokú lomovú húževnatosť a teda dochádza k postupnému poškodzovaniu namiesto okamžitého poškodenia – katastrofického lomu. Zlepšením ich vlastností sa otvárajú dvere ďalšiemu využitiu, napríklad v aplikácií ako žiaruvzdorné izolačné materiály, tepelné a akustické izolačné materiály, odľahčené konštrukčné materiály, filtre rôzneho využitia. Je teda zrejmé, že primárnou funkciou týchto materiálov nie je konštrukčné použitie, no vykazujú vysokú úroveň mechanickej spoľahlivosti. [3, 16]

4 Analýza problému

Pri tvorbe výpočtového modelu sú známe vstupné parametre, ako typ geometrie a rozmery Kelvinovej bunky, materiálové charakteristiky, okrajové podmienky, typ a spôsob zaťaženia. Jedná sa o problém priamy, teda pri riešení tejto statickej úlohy pomocou MKP v programe ANSYS, sú zisťované hodnoty veľkosti reakčnej sily pri definovanom posuve tlačnej opory v osi y , a maximálne prvé hlavné napätie na trámikoch penového jadra. Toto napätie súčasne tvorí podmienku porušovania trámikov, pričom kritickou hodnotou pre jeden trámik, je 30 MPa. Pri deformačnom zaťažení modelu vzorky sú uvažované malé deformácie.

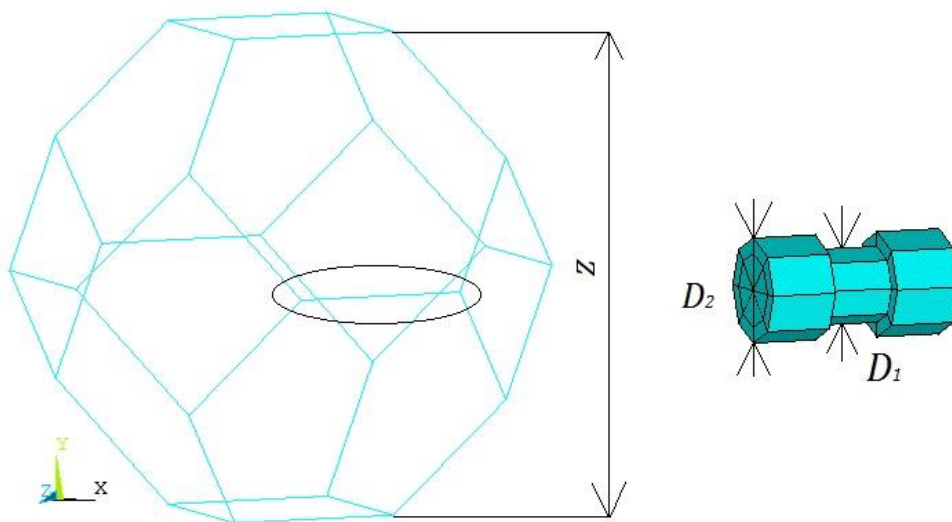
5 Výpočtové modelovanie

Táto kapitola obsahuje opis tvorby geometrie a diskkrétnej štruktúry modelu penového laminátu s Kelvinovou bunkou. Jednotlivé podkapitoly sú venované modelu geometrie vzorky laminátu, materiálovým vlastnostiam, okrajovým podmienkam a modelu zaťaženia.

5.1 Model geometrie

5.1.1 Model geometrie vzorky laminátu

Generovanie modelu bolo započaté prevedením reálnej penovej štruktúry s otvorenou pórovitosťou na zjednodušený model diskkrétnej štruktúry. Najskôr bol vytvorený geometrický model Kelvinovej bunky. Charakteristické rozmery odpovedajúce Kelvinovej bunke s otvorenou pórovitosťou boli veľkosť z , menší priemer trámca D_1 a väčší priemer trámca D_2 , uvedené v tabuľke 5.1. Geometria Kelvinovej bunky s jej charakteristickými rozmermi a zvoleným globálnym súradnicovým systémom je zobrazená na obrázku 5.1.



Obrázok 5.1– model geometrie Kelvinovej bunky

Tabuľka 5.1 – charakteristické rozmery Kelvinovej bunky

veľkosť K. bunky [mm]	z	0,5
priemer menšieho trámca [mm]	D_1	0,067
priemer väčšieho trámca [mm]	D_2	0,0927

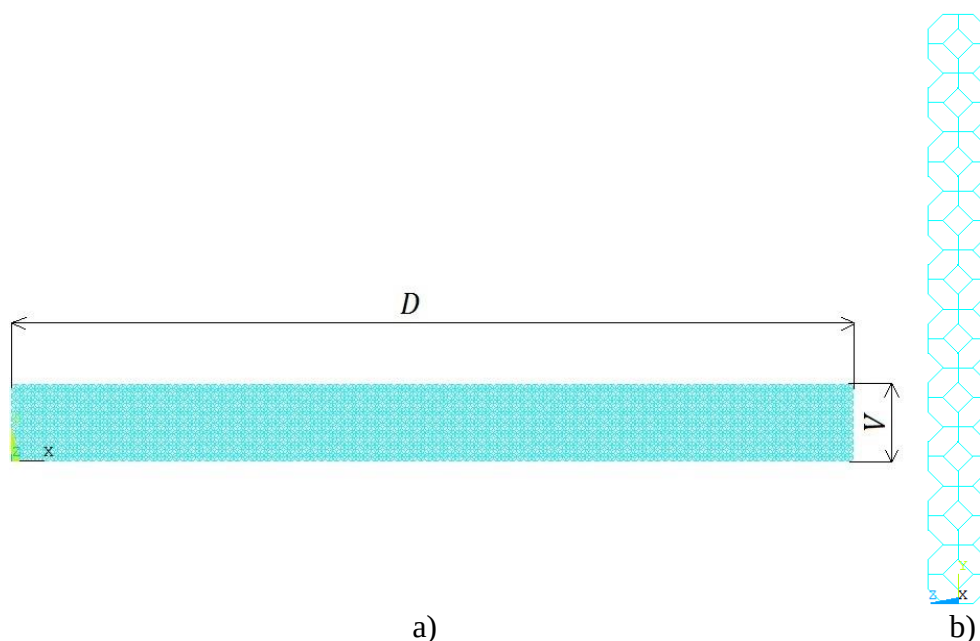
Model štruktúry penového jadra bol vytvorený kopírovaním štruktúry Kelvinovej bunky na optimalizované rozmery modelu vzorky s dĺžkou D a výškou V (tabuľka 5.2).

Tabuľka 5.2 – hodnoty rozmerov modelu jadra vzorky

dĺžka jadra [mm]	D	55
výška jadra [mm]	V	5

Prevedenie štruktúry jadra (Kelvinových buniek) na diskretnú štruktúru, bolo uskutočnené prvkom BEAM189. Sieť konečných prvkov na výpočtovom modeli Kelvinovej bunky bola generovaná tak, že každý z trámikov bunky bol rozdelený na tri rovnako dlhé úseky, ktorým boli pridelené odpovedajúce rozmery priečného prierezu (znázornené v detaile obrázku 5.1).

Pre zjednodušenie riešenia výpočtového modelu diskretnej štruktúry bola využitá rovinná deformácia, ďalej len RD. Vzorka modelu diskretnej štruktúry je teda tvorená jedným radom Kelvinových buniek, ako je znázornené na obrázku 5.2.

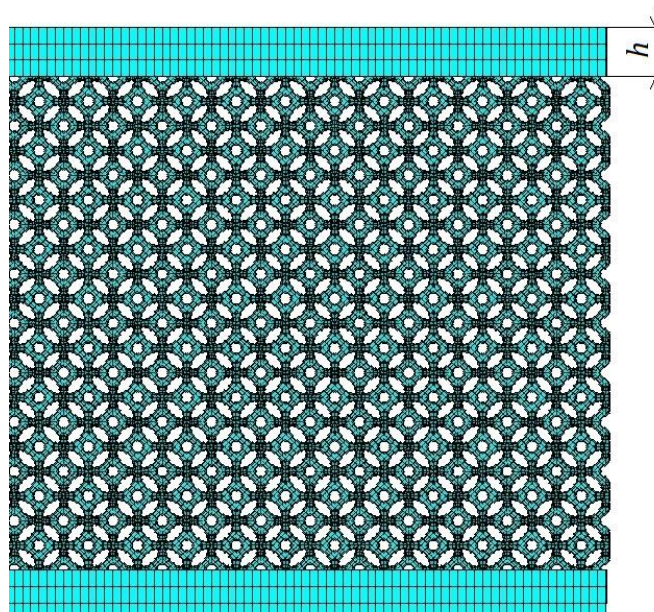


Obrázok 5.2 – a) rozmery jadra vzorky, b) detail radu K. buniek jadra

Model geometrie okrajových dosiek ohraničujúcich penové jadro, zobrazený na obrázku 5.3, je tvorený s rozmerom dĺžky odpovedajúcemu dĺžke modelu jadra z Kelvinových buniek a rozmerom šírky, odpovedajúcemu jednému radu buniek a rozmerom hrúbky, vid' tabuľka 5.3. Model okrajových dosiek bol prevedený na diskretný, prvkom SOLID186.

Tabuľka 5.3 – hodnota hrúbky okrajových dosiek modelu vzorky

hrúbka dosiek [mm]	$h=z$	0,5
--------------------	-------	-----



Obrázok 5.3– model penového laminátu (detail)

5.2 Model materiálových vlastností

5.2.1 Model materiálových vlastností penového jadra

Ako sa už spomínalo v predošlých kapitolách, nosným materiálom penovej štruktúry je keramika. Z toho dôvodu bol pre túto časť modelu uvažovaný Hookovský materiál – lineárne pružný a izotropný. Definovaný bol modulom pružnosti v ťahu $E = 35 \text{ GPa}$ a Poissonovým číslom $\mu = 0,25$.

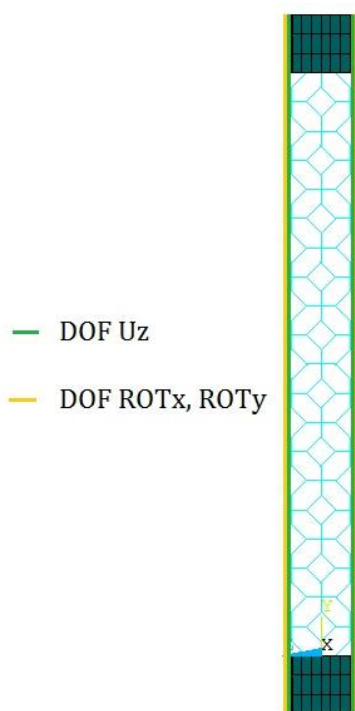
5.2.2 Model materiálových vlastností dosiek

Pre túto časť štruktúry boli využité rovnaké materiálové charakteristiky ako pre štruktúru jadra. Jediná odlišnosť je v diskretizácii štruktúry modelu okrajových dosiek vzorky.

5.3 Model okrajových podmienok

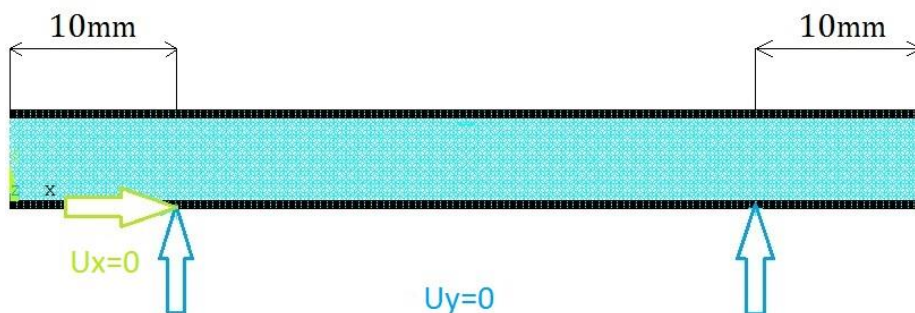
Okrajové podmienky boli vytvorené tak, aby reprezentovali reálnu skúšku namáhanú na trojbodový ohyb s využitím RD.

Aby boli splnené predpoklady správneho riešenia, boli definované okrajové podmienky, zamedzenie posuvu v osi z globálneho súr. systému, $U_z = 0$, rotácie okolo osi x, $ROT_x = 0$ a okolo osi y, $ROT_y = 0$, na prednej a zadnej ploche modelu vzorky kompozitu, vid' obrázok 5.4.



Obrázok 5.4 – model okrajových podmienok – RD

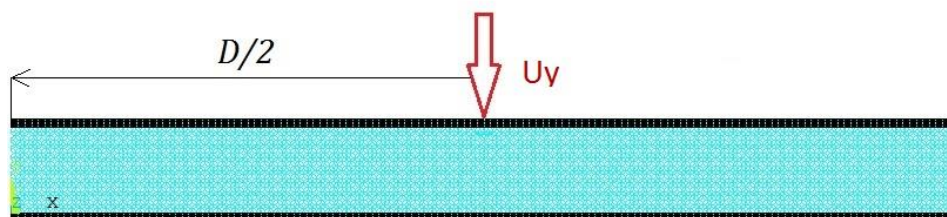
V jednotlivých okrajových podmienkach boli simulované väzby rotačná (vľavo) a väzba oporná (vpravo), znázornené obrázkom 5.5. Tieto väzby boli umiestnené s odsadením 10 mm od okraja vzorky. V ľavej väzbe boli definované OP zamedzenia posuvu v osi x a y globálneho súradnicového systému a pre väzbu pravú bol zamedzený jedine posuv v osi y.



Obrázok 5.5 – model okrajových podmienok vzorky

5.4 Model zaťaženia

Pri vytváraní OP v mieste väzby, určenej ako deformačné zaťaženie vzorky, ktoré bolo umiestnené do polovice dĺžky modelu (obrázok 5.6), bol definovaný posuv proti smeru osi y v globálnom súr. systéme. Posuv sa postupne zväčšoval, až sa zastavil na hodnote, pri ktorej sa iniciovalo porušenie prvého trámika v štruktúre jadra vzorky, teda 0,03 mm. Ďalšie porušovanie štruktúry jadra prebiehalo za deformačného zaťaženia pri konštantnom posuve.



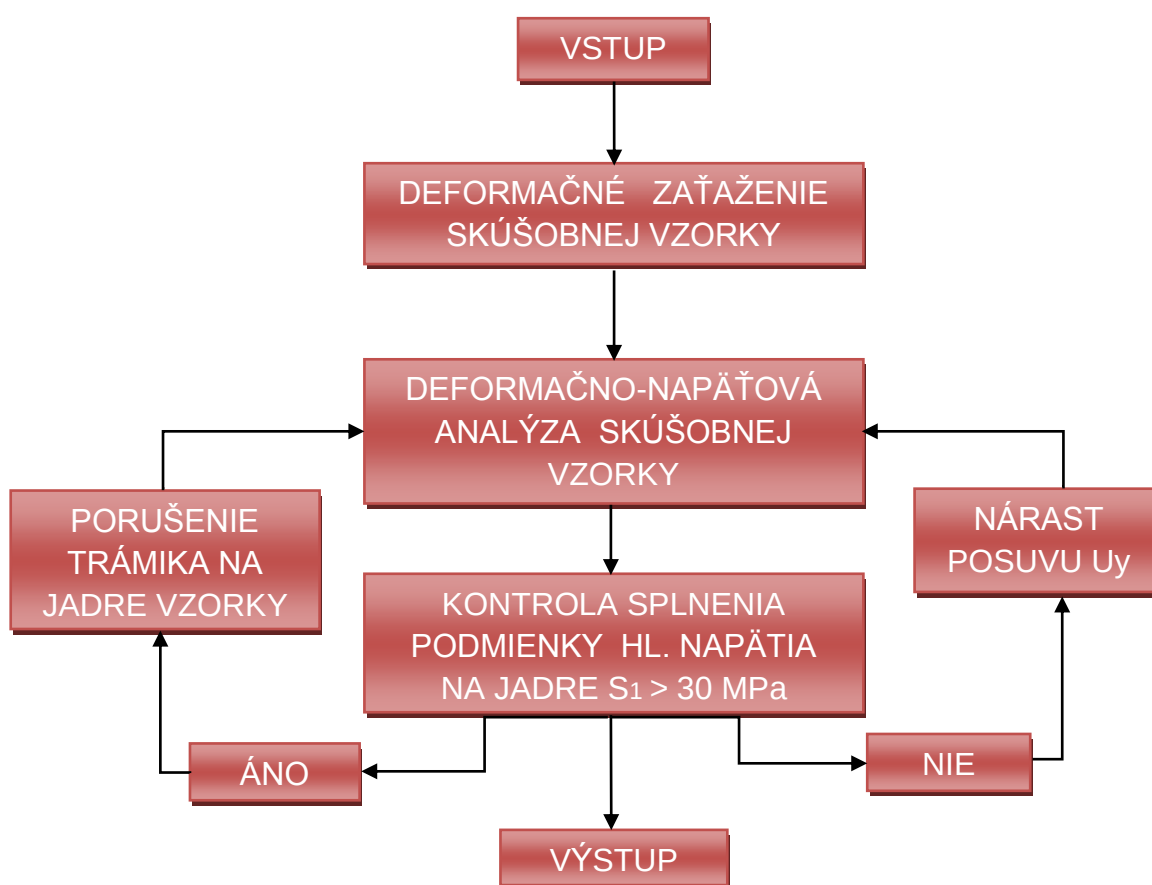
Obrázok 5.6 – model zaťaženia vzorky

6 Realizácia algoritmu riešenia

Samotný algoritmus (obrázok 6.1), pozostáva zo vstupu, tela algoritmu a výstupu. Vstupom bola geometria Kelvinovej bunky, materiálové vlastnosti, okrajové podmienky a typ zaťaženia výpočtového modelu.

Telom algoritmu sa stalo vytvorenie geometrie modelu Kelvinovej bunky a generovanie štruktúry na rozmery modelu vzorky. Po vytvorení kompletného modelu, nasledovalo definovanie postupného deformačného zaťaženia modelu vzorky narastajúcim posuvom proti smeru osi y globálneho súradného systému – trojbodový ohyb. Pri raste zaťaženia modelu vzorky bolo sledované prvé hlavné napätie na penovej štruktúre jadra vzorky. Podmienkou pre zastavenie rastu zaťaženia, bolo dosiahnutie nadkritickej hodnoty prvého hlavného napätia na trámiku jadra modelu vzorky kompozitu. Kritickou hodnotou podmienky bolo napätie 30 MPa. Po presiahnutí tejto hodnoty bol trámik odstránený zo štruktúry a začalo opätovné overovanie podmienky štruktúry jadra zaťaženého modelu vzorky. Algoritmus bol ukončený po nesplnení podmienky presiahnutia kritickej hodnoty prvého hl. napätia v štruktúre jadra kompozitu.

Výstupom algoritmu boli hodnoty reakčnej sily vzorky na zaťaženie, energie na jadre a celom modeli vzorky, hodnoty maximálneho hlavného napätia na prvkoch jadra penového laminátu. Z výstupov bola následne posudzovaná iniciácia a oblasti šírenia sa porúch v jadre penovej štruktúry modelu vzorky kompozitu.



Obrázok 6.1 – schéma algoritmu riešenia

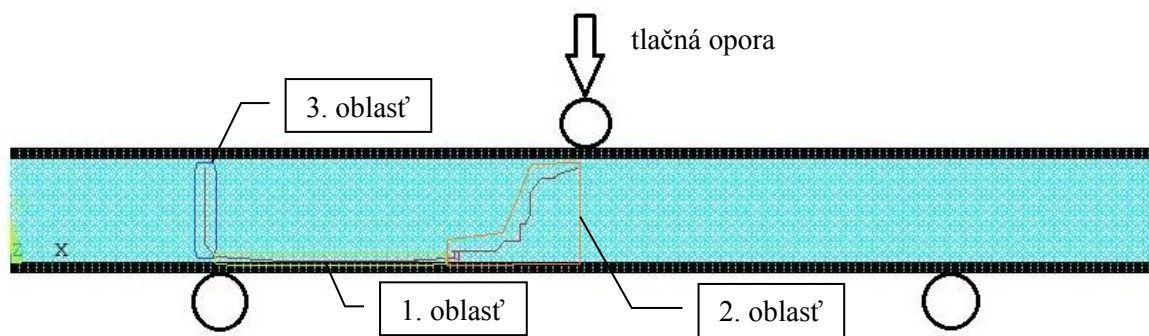
7 Prezentácia a analýza výsledkov

Získané výstupné hodnoty numerického riešenia sú prezentované ako obrázky grafov vykresľujúcich priebeh hodnôt reakčnej sily a hodnôt maximálneho prvého hlavného napätia, vznikajúceho na porušovaných trámikoch štruktúry jadra skúšobnej vzorky, ktorým sa bližšie venuje podkapitola 7.3.

7.1 Oblasti porušovaných trámikov jadra skúšobnej vzorky laminátu

V kapitole je prezentované šírenie poruchy trámikov jadrom penového laminátu od počiatku až po koniec šírenia, rozdelené do troch oblastí (obrázok 7.1), pričom nešlo o súvislé porušovanie, tzn., že porušovanie štruktúry jadra zodpovedalo výskytu maximálnych hodnôt prvého hlavného napätia na trámikoch v štruktúre jadra penového kompozitu, podľa podmienky $\sigma_{1k} = 30 \text{ MPa}$.

1. oblasť – počiatočná porucha trámika sa iniciovala v blízkosti rozhrania štruktúry penového jadra s dolnou okrajovou doskou vzorky penového laminátu. Následne šírenie poruchy štruktúry jadra prebiehalo po rozhraní tejto okrajovej dosky a v jeho tesnej blízkosti.
2. oblasť – šírenie poruchy prechádzalo naprieč jadrom penového laminátu smerujúc k pôsobisku zaťaženia vzorky, teda k tlačnej opore umiestnenej na hornej okrajovej doske v strede zaťaženej vzorky penového laminátu.
3. oblasť – v oblasti nad ľavou oporou došlo k tlakovému namáhaniu štruktúry v dôsledku deformácie zaťaženej vzorky, čomu odpovedajú vysoké hodnoty prvého hlavného napätia na trámikoch, vid' obrázok 7.3. V súlade s podmienkou porušovania trámikov štruktúry vzorky penového laminátu došlo k jeho ukončeniu v oblasti nad ľavou oporou vzorky pod hornou okrajovou doskou penového laminátu.



Obrázok 7.1 – oblasti porušených trámikov jadra vzorky penového laminátu

7.2 Zhodnotenie porušenia štruktúry skúšobnej vzorky laminátu

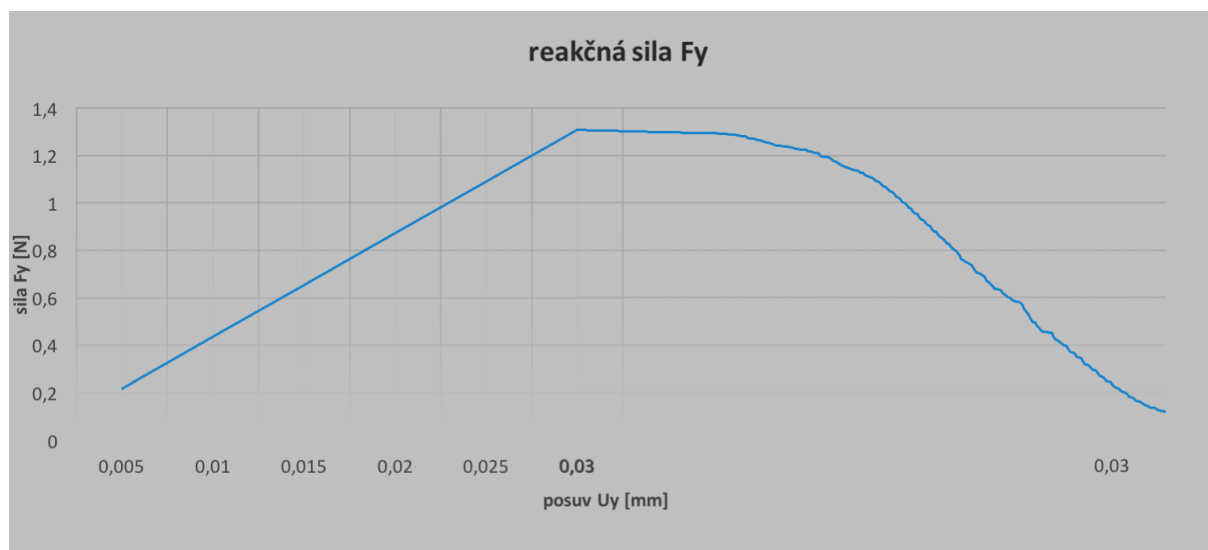
Výskyt porušenia trámikov bol podmienený maximálnymi hodnotami prvého hlavného napätia na trámikoch štruktúry jadra zaťaženej skúšobnej vzorky penového laminátu, $\sigma_1 > \sigma_{1k} = 30 \text{ MPa}$. To znamená, že porušené trámiky nevytvárali spojité porušenie štruktúry, ale k porušeniu dochádzalo vždy v mieste najvyššieho napätia na trámiku štruktúry jadra.

Pri porovnaní s reálnou – heterogénnou štruktúrou penového jadra vzorky, je skúšobná vzorka s homogénnou štruktúrou penového jadra pri zaťažení trojbodovým ohybom predvídateľnejšia, tzn., že šírenie poruchy penového jadra je možné čiastočne predpokladať v oblastiach výskytu vysokého prvého hlavného napätia na trámikoch štruktúry jadra penového laminátu.

Pri namáhaní modelu vzorky penového laminátu so štruktúrou opísanou v predchádzajúcich kapitolách, nedošlo k jeho úplnému porušeniu, šírenie sa zastavilo ešte pred úplnou delamináciou.

7.3 Prezentácia výstupov numerického riešenia

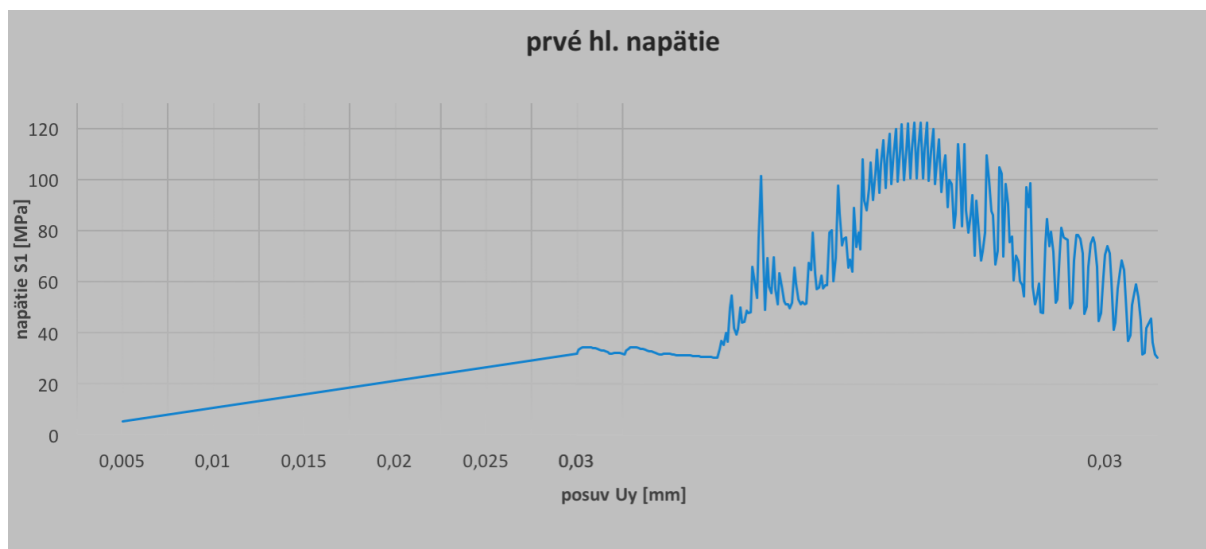
Kapitola zahŕňa prezentáciu hodnôt reakčnej sily pri zaťažení modelu vzorky na obrázku 7.2 a hodnôt maximálneho prvého hlavného napätia na jednotlivých trámikoch, ktoré boli porušované, vid' obrázok 7.3.



Obrázok 7.2 – priebeh reakčnej sily vzorky

Reakčná sila spočiatku lineárne rástla, pričom narastalo napätie v štruktúre modelu vzorky. Hodnota sily dosiahla maximum 1,3084495614 N pri presiahnutí kritickej hodnoty dovoleného napätia na trámiku pri hodnote posuvu proti smeru osi y 0,03 mm – začiatok porušovania. Následne posuv ostával konštantný a šírenie poruchy v penovom jadre modelu

vzorky prebiehalo samovoľne, bez ďalšieho nárastu záťaže vzorky, čo je zrejmé z klesajúcej tendencie krivky priebehu reakčnej sily. Sila dosiahla úplné minimum pri zastavení porušovania štruktúry jadra.

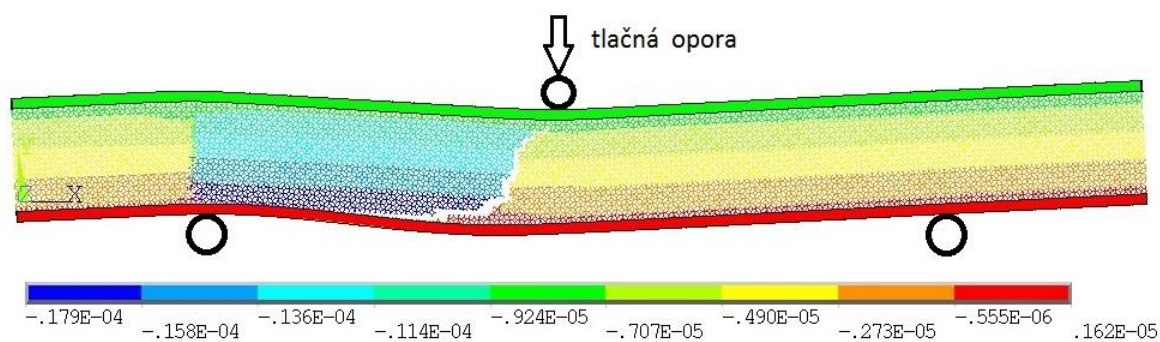


Obrázok 7.3 – priebeh maximálneho hlavného napätia na trámikoch

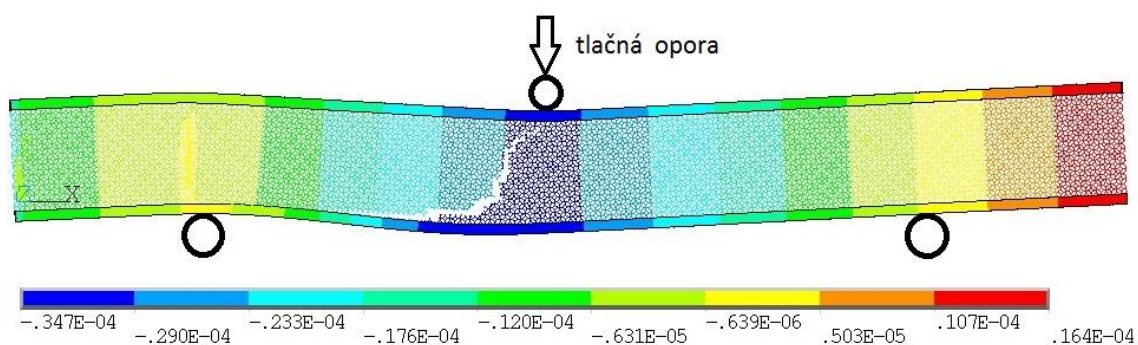
Hodnoty priebehu prvého hlavného napätia na trámikoch opäť lineárne rástli, pokiaľ nepresiahli kritickú hodnotu dovoleného napätia na trámiku v penovej štruktúre jadra kompozitu. Následne šírenie poruchy v jadre prebiehalo za konštantného posuvu, pričom napätie oscilačne rástlo do maximálnej hodnoty 122,35953956 MPa. Následne dochádzalo k poklesu až pod kritickú hodnotu prvého hlavného napätia na trámiku a šírenie poruchy sa zastavilo.

7.4 Prezentácia modelu vzorky po porušení štruktúry

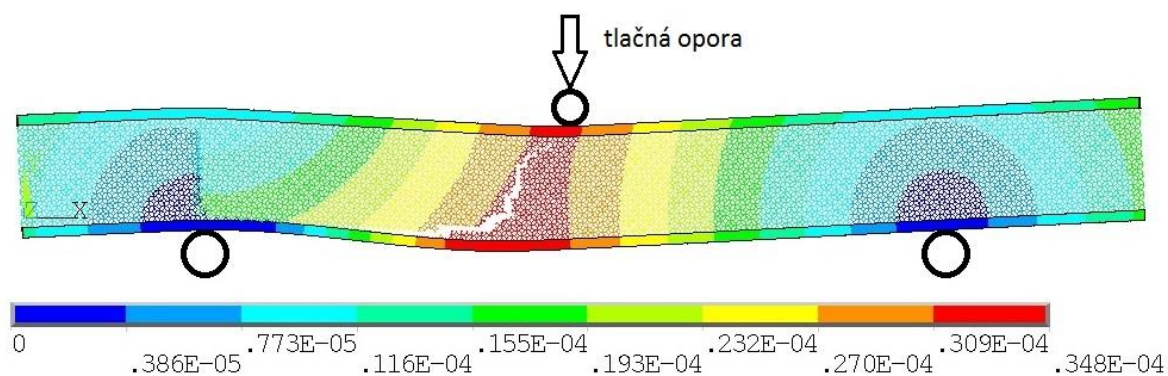
Na nasledujúcich obrázkoch 7.4 – 7.6, sú prezentované jednotlivé konečné posuvy po ukončení šírenia poruchy v štruktúre jadra kompozitu. Naznačené sú taktiež značky jednotlivých opôr, kvôli lepšej predstave deformácie modelu vzorky. Pre názornosť bola pri zobrazení deformácie použitá mierka väčšia než reálna.



Obrázok 7.4 – posuv v osi x (U_x) [m]



Obrázok 7.5 – posuv v osi y (U_y) [m]



Obrázok 7.6 – celkový posuv modelu vzorky (U_{sum}) [m]

Záver

Práca sa zaoberala šírením poruchy trámikov v penovom lamináte s homogénnou štruktúrou. Základnou stavebnou jednotkou štruktúry jadra bola Kelvinova bunka s otvorenou pórovitosťou a charakteristickými rozmermi. Jeden z hlavných krokov k riešeniu problému práce, bolo vytvorenie diskkrétnej štruktúry modelu skúšobnej vzorky penového laminátu. Po vytvorení výpočtového modelu a uskutočnení numerického riešenia zaťaženia skúšobnej vzorky trojbodovým ohybom, bola vykonaná analýza získaných výsledkov. Výpočtové riešenie, rovnako ako vytvorenie modelu, boli realizované pomocou MKP v softvéri ANSYS.

Zo získaných výsledkov boli vyhodnotené priebehy reakčnej sily v mieste styku tlačnej opory s okrajovou doskou laminátu (väzba deformačného zaťaženia skúšobnej vzorky) pri zaťažení skúšobnej vzorky a prvého hlavného napätia na trámiku v štruktúre penového jadra skúšobnej vzorky. Štruktúra jadra bola porušovaná na základe podmienky maximálneho prvého hlavného napätia na trámiku, $\sigma_1 > \sigma_{1k} = 30 \text{ MPa}$.

Výstupom práce bolo rovnako vytvorenie opisu šírenia poruchy trámikov jadra penového laminátu, pri zaťažovaní skúšobnej vzorky.

Keďže sa jedná o problematiku s perspektívnym využitím nie len v leteckom a automobilovom priemysle, ale vo viacerých odvetviach strojného priemyslu, využitie získaných poznatkov tejto štúdie môže prispieť k lepšiemu pochopeniu deformačno-napäťovej odozvy penového laminátu pri zaťažení trojbodovým ohybom.

Použité literárne a informačné zdroje

- [1] – BANGHAI, Jiang, Li ZHIBIN a Lu FANGYUN. Failure mechanism of sandwich beams subjected to three-point bending. *Composite Structures* [online]. 2015, 133, 739-745 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.07.056. ISSN 02638223. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822315006029>
- [2] – BREZNY, Rasto a David J. GREEN. Fracture Behavior of Open-Cell Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 1989, 72(7), 1145-1152 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1989.tb09698.x. ISSN 0002-7820. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1151-2916.1989.tb09698.x>
- [3] – BREZNY, Rasto a David J. GREEN. Mechanical Behavior of Cellular Ceramics. *Materials Science and Technology* [online]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1002/9783527603978.mst0125. ISBN 3527313958. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527603978.mst0125>
- [4] – CARTER, C. Barry, NORTON, M. Grant, *Ceramic materials: Science and Engineering*, 2nd Edition, Springer, 2013. 288 s.
- [5] – Duocel® Foam Properties [online]. ERG Materials and Aerospace Corp. Oakland, USA. [cit. 2009-05-10].
<<http://www.ergaerospace.com/foamproperties/introduction.htm>>.
- [6] – http://old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-11-C.pdf
- [7] – https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Numerical_simulation_on_an_open_cell_metal_foam_Velocity_and_temperature_fields.gif
- [8] – KUCHEROV, Leonid a Michael RYVKIN. Fracture toughness of open-cell Kelvin foam. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2014, 51(2), 440-448 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.10.015. ISSN 00207683. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768313004046>
- [9] – LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. 156 s. ISBN 80-7043-273-X.
- [10] – LORNA J. GIBSON, MICHAEL F. ASHBY., Lorna J. Gibson, Michael F. Ashby. *Cellular solids: structure and properties*. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997. ISBN 0521499119.
- [11] – MENČÍK, J.: *Pevnost a lom skla a keramiky*. 1. vyd., Praha, SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1990, 389 s.
- [12] – MÍŠEK, B.: *Polymery, keramika, kompozity*. 1. vyd., VUT Brno, 1993, 155 s.

- [13] – POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L.: Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek (kovy - keramika - plasty). 1. vyd., VUT Brno, PC-DIR, s.r.o.- Nakladatelství Brno, 1994, 385 s.
- [14] – PTÁČEK, L. A KOLEKTIV: Nauka o materiálu II. 1. vyd., Brno, Akademické nakladatelství CERM,s.r.o., 2003, 392 s.
- [15] – SLABÁKOVÁ, L. Šíření trhlin skloněných k rozhraní keramických laminátů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 73 s.
- [16] – Vysoká škola chemicko-technologická. *Porézní a celulární keramika* [online]. 2003. [cit. 2009-05-02].
<http://www.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-11-C.pdf>.
- [17] – WANG, Ning-zhen, Xiang CHEN, Ao LI, Yan-xiang LI, Hua-wei ZHANG a Yuan LIU. Three-point bending performance of a new aluminum foam composite structure. Transactions of Nonferrous Metals Society of China [online]. 2016, 26(2), 359-368 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64088-8. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632616640888>
- [18] – W. C. YOUNG, R. G. BUDYNAS, Roark's Formulas for Stress and Strain. 7th edit., New York: McGraw-Hill, 2001, s. 832 , ISBN 0071210598

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Veličiny

$\varepsilon_{x,y,z}$	[-]	pomerné pretvorenie
μ	[-]	Poissonove číslo, súčiniteľ priečnej kontrakcie
ρ	[g/cm ³]	objemová hmotnosť, skutočná hustota materiálu
ρ_0	[g/cm ³]	teoretická hustota materiálu
ρ_r	[-]	relatívna hustota materiálu, pomer
$\sigma_{x,y,z}$	[MPa]	napätie v osi súr. systému podľa prislúchajúceho indexu
σ_{1k}	[MPa]	prvé hl. napätie kritické na trámiku štr. jadra vzorky
σ_1	[MPa]	prvé hlavné napätie na trámiku štruktúry jadra vzorky
φ	[-]	celková pórovitosť materiálu (peny)
a, b	[-]	konštanty závisiace na tvare póru
c	[mm]	vzdialenosť neutrálnej osi k ťahovému povrchu
D	[mm]	dĺžka geometrie modelu jadra vzorky laminátu
D_1	[mm]	menší priemer trámca na Kelvinovej bunke
D_2	[mm]	väčší priemer trámca na Kelvinovej bunke
E	[MPa, GPa]	Youngov modul, modul pružnosti materiálu v ťahu
$E_{1,2}$	[MPa, GPa]	Youngov modul v smere vlákien, naprieč vláknami
E_0	[MPa, GPa]	modul pružnosti hutného materiálu (bez pórov)
G	[MPa, GPa]	modul pružnosti v šmyku
h	[mm]	hrúbka okrajových dosiek vzorky laminátu
J_y	[mm ⁴]	modul prierezu v ohybe, kvadratický moment prierezu
K_{1c}	[MPa.m ^{1/2}]	lomová húževnatosť
L	[mm]	dĺžka steny štruktúry
M	[Nm]	ohybový moment
t	[mm]	hrúbka steny štruktúry
V	[mm]	výška geometrie modelu jadra
V_p	[-]	objemový podiel pórov
z	[mm]	základný rozmer Kelvinovej bunky

Skratky

CFD – computational fluid dynamics (výpočtová dynamika kvapalín)

MKP – metóda konečných prvkov

OP – okrajové podmienky

RD – rovinná deformácia

Zoznam použitých obrázkov

Obrázok 3.1 – schéma spevňovacieho vrstvenia vláknového laminátu.....	16
Obrázok 3.2 – schéma trojbodového ohybu sendvičového kompozitu [16].....	19
Obrázok 3.3 – a) schéma sendvičového kompozitu, b) rozloženie namáhania, c) rozloženie napätia	19
Obrázok 3.4 – porézny štruktúry morskej hubky [3]	20
Obrázok 3.5 – mikroštruktúra izolačnej keramickej dosky raketoplánu v vláknami z SiO_2 [4]	20
Obrázok 3.6 – numerická simulácia prúdenia a prenosu tepla (CFD) v štruktúre kovovej peny s otvorenou pórovitosťou [7]	21
Obrázok 3.7 – model tetrakaidekaedru – Kelvinova bunka [10]	22
Obrázok 3.8 – reálna štruktúra s otvorenou pórovitosťou [5].....	22
Obrázok 3.9 – štruktúra s pravidelnou mriežkou – honeycomb [10].....	23
Obrázok 3.10 – polyuretán a) štruktúra s otvorenou pórovitosťou, b) štruktúra s uzavretou pórovitosťou, c) nikel, d) meď, e) zirkón, f) mulit – porcelán, g) sklo, h) kombinovaná štruktúra – polyéterová pena [10]	23
Obrázok 5.1 – model geometrie Kelvinovej bunky	25
Obrázok 5.2 – a) rozmery jadra vzorky, b) detail radu K. buniek jadra	26
Obrázok 5.3 – model penového laminátu (detail).....	27
Obrázok 5.4 – model okrajových podmienok – RD	28
Obrázok 5.5 – model okrajových podmienok vzorky	28
Obrázok 5.6 – model zaťaženia vzorky	29
Obrázok 6.1 – schéma algoritmu riešenia	30
Obrázok 7.1 – oblasti porušených trámikov jadra vzorky penového laminátu.....	31
Obrázok 7.2 – priebeh reakčnej sily vzorky	32
Obrázok 7.3 – priebeh maximálneho hlavného napätia na trámikoch	33
Obrázok 7.4 – posuv v osi x (U_x) [m]	34
Obrázok 7.5 – posuv v osi y (U_y) [m]	34
Obrázok 7.6 – celkový posuv modelu vzorky (U_{sum}) [m].....	34

Zoznam použitých tabuliek

Tabuľka 5.1 – charakteristické rozmery Kelvinovej bunky.....	25
Tabuľka 5.2 – hodnoty rozmerov modelu jadra vzorky	26
Tabuľka 5.3 – hodnota hrúbky okrajových dosiek modelu vzorky	27