



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

ANALÝZA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

SANDWICH STRUCTURE ANALYSIS USING FINITE ELEMENT METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ BUCŇÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL MALIŠ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Bucňák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Analýza sendvičových struktur metodou konečných prvků

v anglickém jazyce:

Sandwich structure analysis using Finite Element Methods

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte porovnání možností simulace sendvičových struktur z kompozitních materiálů metodou konečných prvků. Zaměřte se na rozbor využitelných materiálových modelů pro simulace jádra sendviče, které jsou obsahem standardní nabídky komerčně dostupného balíku MSC. Patran/Nastran. Teorie aplikujte na jednoduchých vzorcích využívaných při laboratorních zkouškách materiálu.

Cíle bakalářské práce:

1. Rozbor požadavků kladených na jednotlivé komponenty sendvičových struktur
2. Rozbor vhodných materiálových modelů
3. Aplikace na laboratorní vzorky

Seznam odborné literatury:

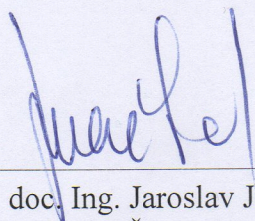
- [1] Nettles A.T. Basic Mechanisc of Laminated Composite Plates, NASA Reference publication 1351, Marshall Space Flight Centre, Alabama 1994
[2] Niu,C.Y.M., Composite Airframe Structure, Hong Kong Conmilit Press Ltd., Brno, 2005, 664 stran,
[3] Middleton, D.H., Composite Material in Aircraft Structure, Longman Singapore Publisher Ltd.,1990, 379 stran

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Mališ, Ph.D.

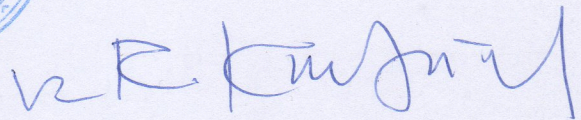
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 15.11.2013





doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na rozbor materiálového modelu jádra sendvičových struktur. Chování sendvičového jádra je simulováno pomocí metody konečných prvků (MKP) v programech MSC.Patran/Nastran. První část se věnuje popisu vlastností sendvičových struktur a jeho částí. Jsou zde uvedeny příklady uplatnění sendvičových struktur. Další část popisuje základní materiálové modely. V poslední části je provedena MKP analýza materiálového modelu pěnového jádra sendviče a porovnání výsledků se zkouškou čtyřbodového ohybu.

Klíčová slova: sendvičové struktury, materiálový model, pěnové jádro, MKP, kompozity

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the analysis of material model core sandwich structures. The behavior of the sandwich core is simulated using Finite Element Method (FEM) in programs MSC.Patran/Nastran. The first part deals with describing the properties of sandwich structures and its components. There are presented examples of the application of sandwich structures. The next section describes the elementary material models. In the last part of bachelor's thesis is performed FEM analysis of material model sandwich foam core and comparison to the results with the four-point bending test.

Key words: sandwich structures, material model, foam core, FEM, composites

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BUCŇÁK, O. *Analýza sendvičových struktur metodou konečných prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Mališ, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalu Mališovi, Ph.D. za příležitost pracovat na daném tématu, konzultace, rady, cenné připomínky a hlavně za věnovaný čas. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a svým blízkým za podporu během studia.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze pod odborným vedením Ing. Michala Mališe, Ph.D. a s použitím literatury, kterou uvádím v seznamu na konci této práce.

V Brně dne 30. 5. 2014

.....
Ondřej Bucňák – autor práce

OBSAH

OBSAH	9
1 Úvod	10
2 Charakteristika sendvičových struktur	11
2.2 Mechanické vlastnosti a druhy porušení sendvičových struktur	11
2.3 Vnější vrstvy – potahy sendvičových struktur	13
2.3.1 Kovové potahy	14
2.3.2 Nekovové potahy	14
2.4 Jádro sendvičových struktur	18
2.4.1 Pěny	19
2.4.2 Voštiny	20
2.4.3 Balsa	22
2.4.4 Další jádrové konstrukce	22
2.5 Použití a vyhodnocení sendvičových struktur	23
3 Materiálové modely jádra sendvičových struktur	26
3.1 Elastické materiálové modely	26
3.2 Elasticko-plastický materiálový model	28
3.3 Další materiálové modely	29
3.4 Materiálové konstanty	29
3.5 Volba materiálového modelu jádra	30
4 Analýza sendvičových struktur	31
4.1 MSC.Patran/Nastran	31
4.2 Analyzovaný vzorek	31
4.3 Tvorba MKP modelu	32
4.3.1 Tvorba sítě MKP modelu	32
4.3.2 Volba okrajových podmínek	33
4.3.3 Volba materiálových modelů	34
4.3.4 Vlastnosti elementů	34
4.4 Vliv chování při změně materiálových charakteristik	35
4.4.1 Hodnota meze kluzu σ_y	35
4.4.2 Hodnota zpevnění HS	36
4.4.3 Hodnota modulu pružnosti v tlaku	37
4.4.4 Hodnota modulu pružnosti ve smyku	38
4.5 MKP analýza vlivů zkoušky na materiálový model	39
4.5.1 Vliv rozložení napětí pod zatížením	39
4.5.2 Vliv asymetrického zatížení	40
4.6 Odpovídající materiálový model	41
5 Závěr	42
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	43
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
8 SEZNAM PŘÍLOH	50

1 ÚVOD

Posouvání lidských hranic vede inženýry a vědce k rozvoji a nalézání nových lehčích materiálů. Těmito materiály mohou být kompozity, plasty, pěny aj. Kompozitní materiály nám dávají možnost cestovat do vesmíru, šetřit palivo k pohonu letadel, aut a jiných významných dopravních prostředků. Jeden z druhů kompozitních materiálů jsou sendvičové struktury. Tento druh kompozitů má velký potenciál a jeho aplikace je od sportovních potřeb až po kosmický průmysl. Sendvičové struktury jsou žádaným materiálem, protože poskytují snížení hmotnosti a tím lze ušetřit množství paliva potřebné k pohonu dopravních prostředků.

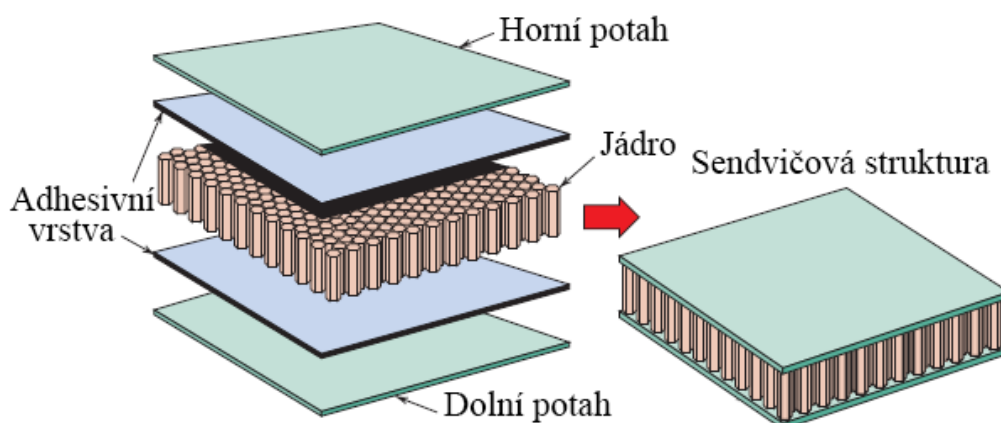
V současné době se k navrhování součástí používá tzv. metoda konečných prvků (dále MKP). Tato výpočetní metoda slouží ke kontrole, optimalizaci a předpovídání chování součástí za daných podmínek zatěžování. Při vytváření MKP modelu je nutné zvolit správný materiálový model tak, aby nejlépe odpovídal vlastnostem skutečného materiálu součásti.

Tato práce se zabývá popisem vlastností kompozitních sendvičových struktur a je zaměřená na rozbor materiálového modelu jádra sendviče. Materiálový model a jeho vlastnosti byly analyzovány pomocí MKP. MKP simulace a porovnání výsledků byly provedeny na jednoduchém vzorku zkoušky čtyřbodového ohybu.

První část práce je zaměřená na vlastnosti sendvičových struktur, rozbor jednotlivých komponent a jejich možnost uplatnění v reálném životě. V druhé části práce jsou popsány charakteristiky vybraných materiálových modelů. V závěru práce je provedena analýza pěnového sendvičového jádra s použitím MKP v programech MSC.Patran/Nastran. Je zde proveden rozbor materiálových modelů charakterizující sendvičové jádro. Výsledky z MKP analýzy jsou porovnávány s výsledky zkoušky.

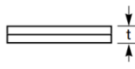

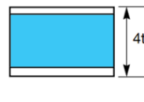
2 CHARAKTERISTIKA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Sendvičové struktury jsou speciálním druhem vrstvených kompozitních konstrukcí složených z kombinace odlišných materiálů, které jsou navzájem spojené tak, aby uplatnily výhody vlastností jednotlivých složek [1], [2]. Sendvič se skládá ze dvou tenkých velmi pevných a tuhých vnějších vrstev (potahů) spojené s lehkým a poddajným jádrem, které má výraznou tloušťku vůči vnějším potahům (viz obr. 2.1).



Obr. 2.1 Základní schéma sendvičových struktur [1].

Spojení mezi potahem a jádrem tvoří adhesivní vrstva, která je z vhodného druhu adhesivního materiálu nebo součástí matrice kompozitu vnější vrstvy. Toto rozhraní je důležité pro správnou funkčnost celého sendviče. Hlavní výhoda sendvičových struktur souvisí s porovnáním mezi sendvičovou konstrukcí a tenkostěnnou konstrukcí. Z poměru ohybové tuhosti a hmotnosti je výhodnější sendvičová konstrukce (viz obr. 2.2). Nejčastější skladba sendvičů je z jádra a ze dvou potahů, které mají stejný materiál, orientaci vláken a tloušťku. Nicméně, v různých případech jsou potahy z odlišného materiálu, různého vrstvení a orientace vláken. Důvodem je případ, kdy nastává zatěžování pouze z jedné strany součásti [3], [4], [5], [6].

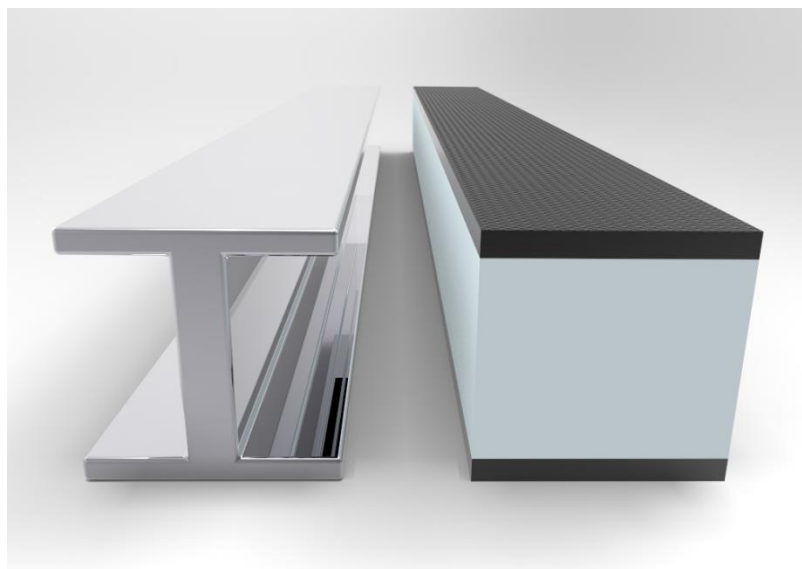
	Laminát	Sendvičová struktura	
			
Relativní tuhost	1	7	37
Relativní pevnost	1	3,5	9,25
Relativní hmotnost	1	1,03	1,06

Obr. 2.2 Ukázka hlavní výhody sendvičových konstrukcí oproti klasickým [7].

2.2 Mechanické vlastnosti a druhy porušení sendvičových struktur

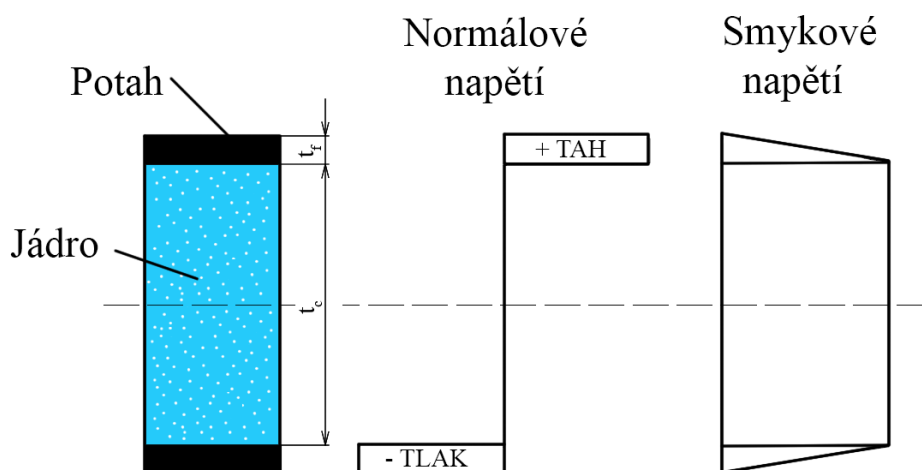
Sendvičové struktury jsou podobné „I“ profilu nosníku (viz Obr. 2.3). Tento typ průřezu efektivně využívá toho, že velké množství hmoty materiálu je umístěno vzdáleně od neutrální osy (centra ohybu) a tak přenáší ohybové a plošné síly

podobně jako potahy. Menší množství hmoty mezi obrubami „I“ profilu vytváří jejich spojení. Tím lze uspořit hmotnost součásti [2], [8].



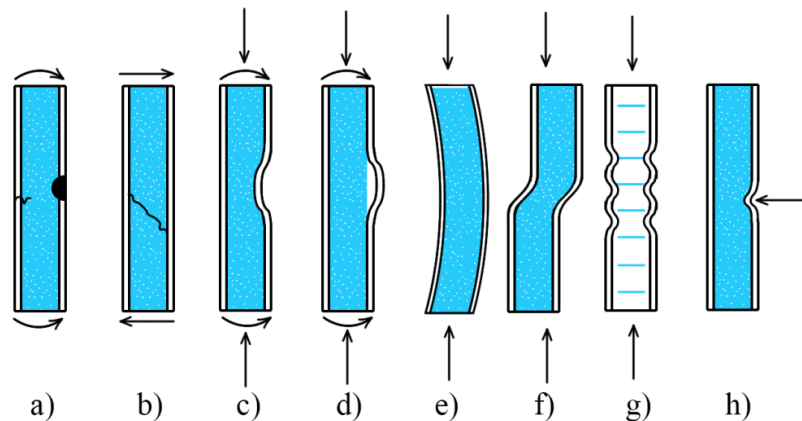
Obr. 2.3 Podobnost „I“ profilu a sendvičové struktury [9].

Základním znakem sendvičových struktur je přenos tahového a tlakového zatížení potahy a smykové zatížení, vznikající mezi potahy, přenáší jádro (viz obr. 2.4). Proto je nutné brát v úvahu smykovou pevnost jádra sendviče [5].



Obr. 2.4 Charakteristické rozložení napětí po průřezu (při zatížení a za předpokladů $E_c \ll E_f$ a $t_f \ll t_c$, popis veličin níže) [10].

O pevnosti tlaku ve směru hloubky sendviče rozhoduje pevnost jádra v tlaku, tloušťka potahů a jejich tuhost [5]. Adhesivní vrstva musí být schopná přenášet smykové síly mezi potahem a jádrem. Obecným pravidlem je, že má být schopná přenést smykové napětí stejně velké jako jádro sendviče [11]. Porušení sendvičových struktur nastává ve vnější vrstvě nebo v jádru. Příklady možných porušení jsou na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Příklady porušení sendvičových struktur – a) lom nebo plastické chování potahu, b) smykové porušení jádra, c) zborcení jádra a zvlnění potahu, d) porušení adhesivní vrstvy a zvlnění potahu, e) ztráta vzpěrné stability, f) zvlnění smykem, g) zvrásnění, h) lokální stlačení [12].

Dle literatury [11] je za určitých předpokladů tuhost sendviče D dána rovnicí (2.1). Prvním předpokladem je modul pružnosti jádra mnohem menší než potahu ($E_c \ll E_f$). Druhý souvisí s tloušťkou jádra, která je výrazně větší než tloušťka potahu ($t_f \ll t_c$).

$$D = E_f \frac{bt_f h^2}{2} \quad (2.1)$$

Z rovnice je zřejmé, že tuhost je přímo úměrná druhé mocnině tloušťky sendvičových struktur. Z literatury [8], [10], [3] vychází rovnice (1.2), která popisuje celkový průhyb u tříbodového ohybu (vzorku ze sendvičové struktury). Tedy, celková deformace sendvičových struktur je složená ze složky ohybové a smykové. Ohybová složka deformace je závislá na velikosti modulu pružnosti v tahu/tlaku potahů E_f a smyková složka je závislá na modulu pružnosti ve smyku jádra G_c .

$$\delta = \delta_{ohyb} + \delta_{smyk} = \frac{1}{24} \frac{Fl^3}{E_f bt_f h^2} + \frac{Fl}{bhG_c} \quad (2.2)$$

2.3 Vnější vrstvy – potahy sendvičových struktur

Potahy jsou tenké, ale velmi tuhé oproti jádru. Jsou vystaveny účinkům vnějšího prostředí, a proto je na ně kladeno několik požadavků:

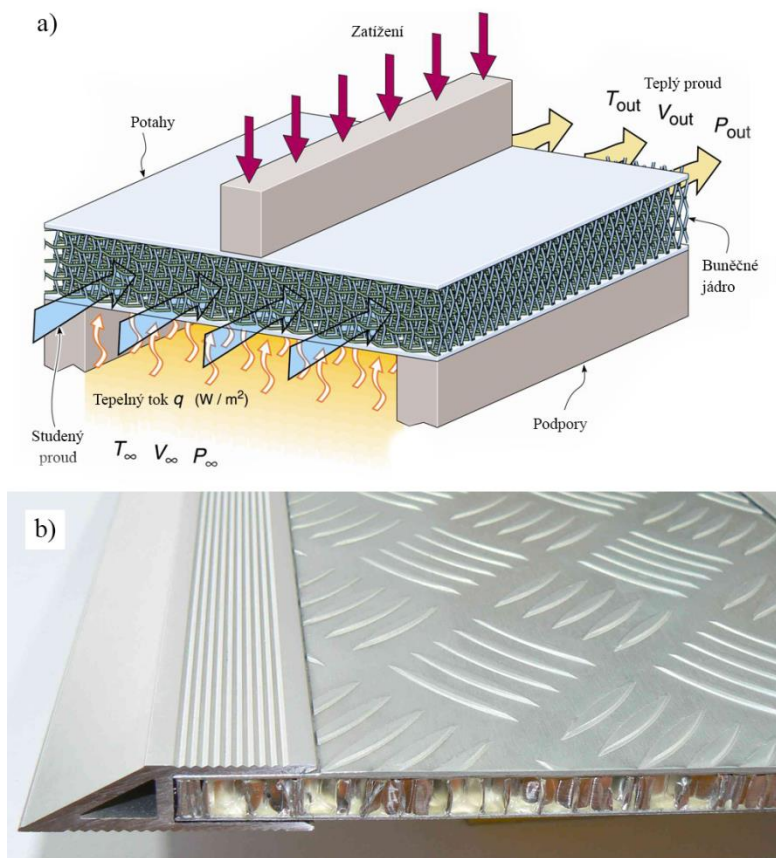
- nízká hmotnost
- tuhost a pevnost
- odolnosti proti opotřebení, únavě, teplotě, chemikáliím
- schopnost absorbovat energii od nárazu
- korozivzdornost
- nehořlavost
- tepelná vodivost
- odolnost proti vlhkosti
- nízká cena a vzhled

Materiály potahů jsou kovové, nekovové nebo jejich kombinace (hybridní lamináty).

2.3.1 Kovové potahy

Kovy jako materiál vnější vrstvy sendvičů mají uplatnění především v lodním, dopravním a stavebním průmyslu. Příkladem použití kovových potahů viz obr. 2.6. Druhy materiálů kovových potahů:

- hliníkové slitiny
- oceli
- titanové slitiny
- měď a její slitiny



Obr. 2.6 Příklady použití kovových potahů: a) měděný výměník tepla [13], b) hliníková plošina pro vozíčkáře v autobusu (jádrem je hliníková voština) [14].

2.3.2 Nekovové potahy

Nekovové potahy mají všestranné využití v mnoha oblastech. Druhy nekovových materiálů jsou:

- kompozitní materiály
- plasty
- dřevo
- papírová lepenka

Kompozitní materiály

Významným nekovovým potahem je vláknem vyztužený kompozit. Zde se projevuje přednost sendvičových struktur, tj. výborná měrná pevnost. Kombinace s kompozitním potahem činí sendvič žádaným materiálem pro aplikace, kde hraje značnou úlohu hmotnost součásti, např. letectví, kosmický průmysl, závodní auta aj. Nevýhoda vláknových kompozitů je vysoká cena a nutnost kvalitního technologického zpracování a návrhu.

Hlavní složky vláknového kompozitu jsou vlákna a polymerní matrice [15]. Přídavné složky mohou tvořit zpevňující částice (nanočástice) nebo další různá aditiva, která mohou zlepšovat vlastnosti: lepší pevnost rozhraní vlákno-matrice, odolnost proti UV záření, odolnost proti únavě atd. [6], [16]. Vláknové kompozity se dělí do skupin, viz obr. 2.7.

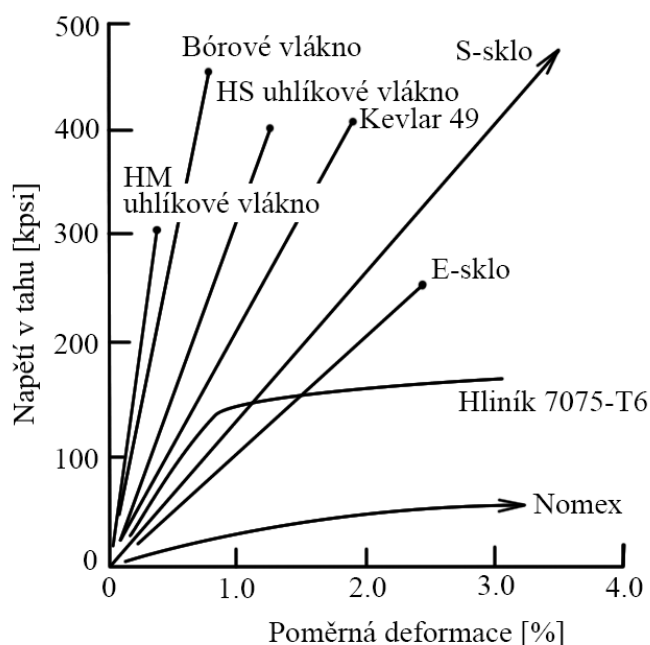


Obr. 2.7 Rozdělení vláknových kompozitů [17].

Nejvíce používané vlákna jsou:

- skelné
- uhlíkové
- aramidové (Kevlar[®])

Skelné vlákno je nejlevnější. Uhlíkové vlákno má vysokou pevnost a modul pružnosti v tahu. Aramidové vlákno má nejnižší hustotu a dobrou schopnost absorbovat energii [15]. Porovnání vláken dle pevnosti viz obr. 2.8.



Obr. 2.8 Porovnání jednotlivých vláken [15].

Polymerní matrice je ve formě různých pryskyřic. Nejpoužívanější je termosetová (reaktoplastická) a termoplastická. Při jejich porovnání termosety nabízí nižší viskozitu, nižší teplotu a tlaky při výrobě kompozitu a nízkou cenu. Naproti tomu termoplasty mají neomezenou dobu skladování, rychlejší výrobní cyklus. Epoxidová pryskyřice je nejpoužívanější matricí v letectví [15]. Termoplastové pryskyřice se zpracovávají vstřikováním, lisováním, vytlačováním. Termosety jsou vhodnou matricí pro dlouho vláknové a hybridní kompozity [6].

Termosetová pryskyřice:

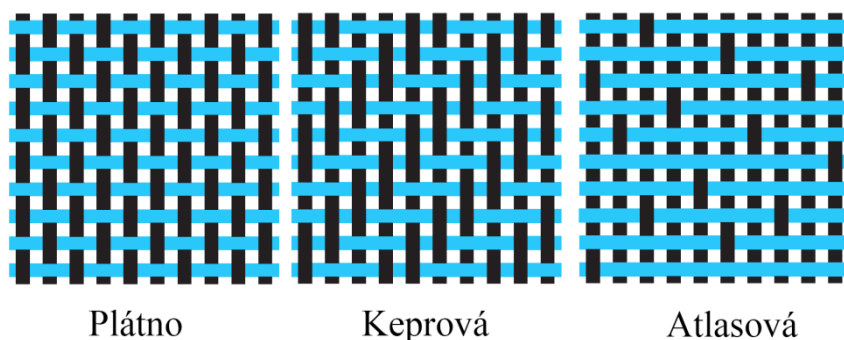
- polyesterová
- epoxidová
- polyimidová
- fenolická

Termoplastická pryskyřice:

- polyethylenová
- polystyrenová
- polyamidová
- polypropylenová

Vlákna jsou ve formě tkanin, prepregů, pásků, rohoží nebo rovingů. Prepregy jsou předem nasycená vlákna a částečně vytvrzené (musí se uchovávat v chladu), které slouží jako polotovary pro další zpracování. Rovingy jsou sdružené tenké vlákna (prameny) a slouží pro výrobu prepregů, tkanin nebo pro technologické zpracování splétáním. Tkaniny mohou být pleteny a prošívány v různých směrech (vícerozměrné tkaniny). Hlavní typy dvourozměrných tkanin jsou na obr. 2.9.

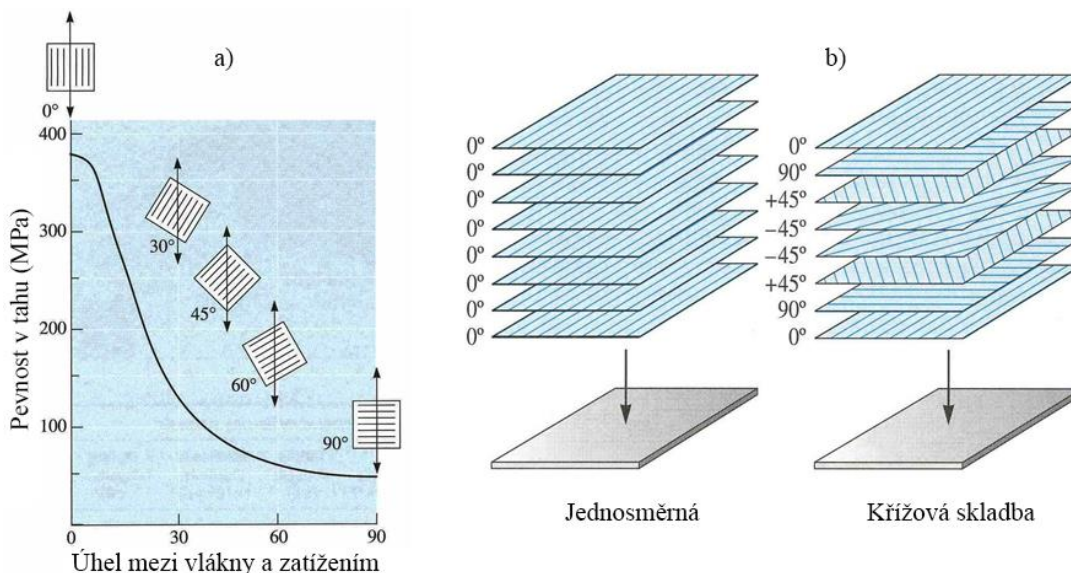
Speciálním druhem jsou hybridní tkaniny, které jsou složené ze dvou a více typů vláken [15], [16].



Obr. 2.9 Příklady tkanin [18].

Tkaniny nebo prepregy se skládají dohromady (laminace) do vrstev až vytvoří laminátový kompozit (viz obr. 2.10b). Poté vrstva vláken nebo laminátového kompozitu po spojení s jádrem se stane potahem.

Vlastnosti polymerních kompozitů lze upravovat v širokém rozmezí hodnot v závislosti na volbě matrice, vláken, objemovém podílu výztuže (se zvyšujícím rostou mechanické vlastnosti) a jejím prostorovém uspořádání. Orientace vláken ve vrstvě (tedy i vrstvy v laminátu) má značný vliv na výsledné mechanické vlastnosti [1]. Vliv orientace vláken je na obr. 2.10a.



Obr. 2.10 a) vliv úhlu natočení vláken k působící síle, b) skladba a směr vrstev [19].

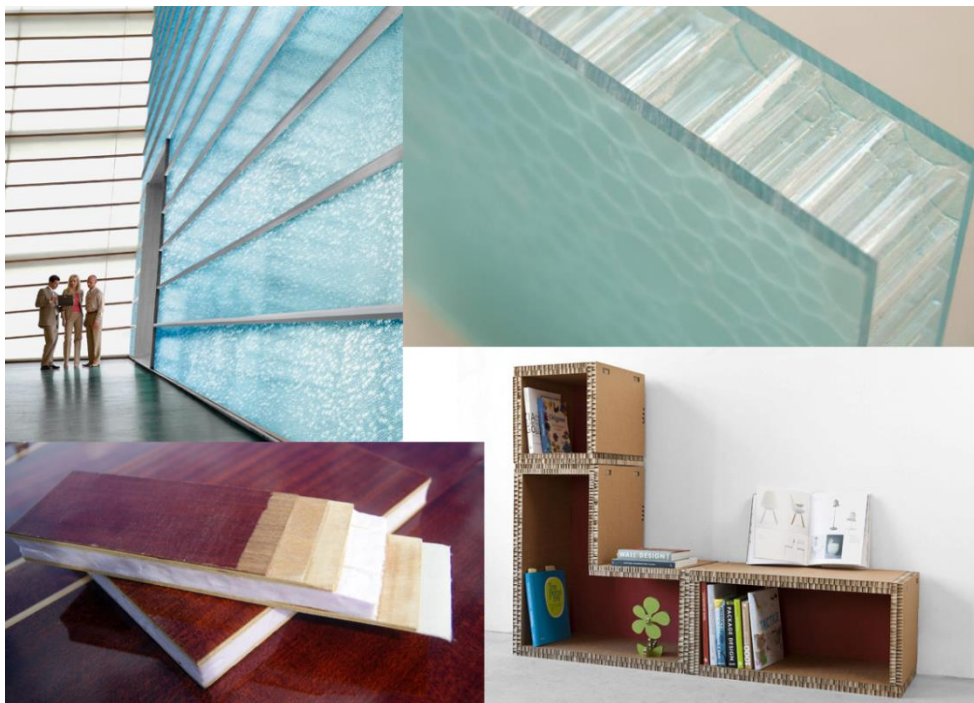
Vláknové kompozity s keramickou maticí byly testovány na vzorku sendviče, kde potah byl složen z matrice SiC (karbid křemíku) a uhlíkových vláken a jádrem byla keramická pěna. Struktura měla dobrou odolnost proti tokům vysokých teplot prostředí (150 W/cm^2), odolnost proti nárazu projektilu. Výsledky ukázaly možnost využití této struktury pro náběžné hrany v kosmických aplikacích.



Obr. 2.11 Příklad potahu z vláknového kompozitu s keramickou maticí (C/SiC) [20].

Dřevo, plasty, papírová lepenka

Další materiály potahů jsou využívány především v architektuře za účelem designu budov nebo jako dekorativní nábytek. Firma Marvel nabízí plastové voštinové panely, vyrobené z rostlinných vláken [21]. Dřevěné potahy mohou být uplatňovány v lodním průmyslu.



Obr. 2.12 Příkladů ostatních typů potahů [22], [21], [23], [24].

2.4 Jádro sendvičových struktur

Jádra pro sendvičové struktury jsou navrhována tak, abychom dosáhli nejnižší hmotnosti, ale zároveň vysokou tuhost celého sendviče.

Hlavní požadavky pro materiál jádra jsou:

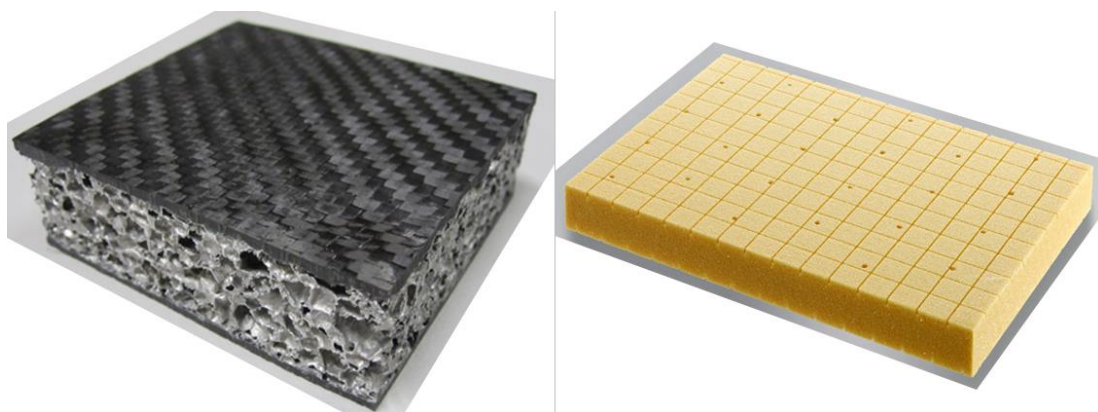
- nízká hustota
- vysoká smyková pevnost a tuhost
- dobrá pevnost v tlaku
- odolnost proti vysokým teplotám, absorbování vody
- izolační a tlumící schopnosti

Rozdělení sendvičových jader:

- pěny
- voštiny
- balsa
- další jádrové konstrukce

2.4.1 Pěny

Pěny jsou jedny z nejběžnějších forem materiálu jádra. Polotovár je formou pěnových bloků. Vyrábějí se z mnoha druhů polymerů [25]. Mohou se vyskytovat ve formě kovů (hliníkové pěny) [26].



Obr. 2.13 Příklad hliníkové (vlevo) a polymerní (vpravo) pěny [27], [28].

Typy polymerních pěn:

- polyvinylchlorid – PVC (Airex[®], Herex[®], Divinycell[®])
- polyuretan – PUR
- polymetakrylid – PMI (Rohacell[®])
- polystyren – PS
- polypropylen – PP
- fenolická pěna
- a další...

Hustota pěn se pohybuje 30–300 kg/m³ [25]. Se stoupající hustotou rostou i mechanické vlastnosti, např. pevnost jádra ve smyku [5].

PVC pěna

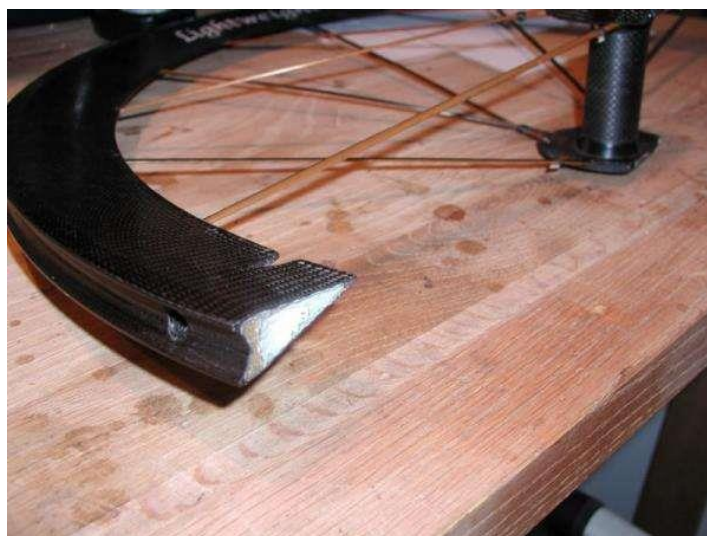
Nejpoužívanější jsou PVC pěny s uzavřenými buňkami. Ačkoliv jsou chemickým hybridem PVC a PUR, označují se pouze jako PVC pěny. Nabízí dobrou odolnost proti absorpci vody a vůči mnoha chemikáliím. Struktura polymerních řetězců je lineární nebo zesítěná. Lineární struktura se snadno tváří teplem a je tuhá, ale celkové mechanické vlastnosti jsou horší než u zesítěné PVC pěny [25].

PUR pěna

Má nízkou cenu, ale problémové rozhraní mezi jádrem a potahem. Je primárně určená pro automobilní průmysl a jako tepelná izolace [3], [25].

PMI pěna

Je dražší než ostatní druhy pěn. Protože má skvělé mechanické vlastnosti, používá se především v leteckém průmyslu [3], např. listy vrtulí, vztlaková klapka [25]. Ve sportovním odvětví se PMI pěna aplikuje v sendvičové konstrukci ráfku kol firmy Lightweight (viz obr. 2.14) [29].



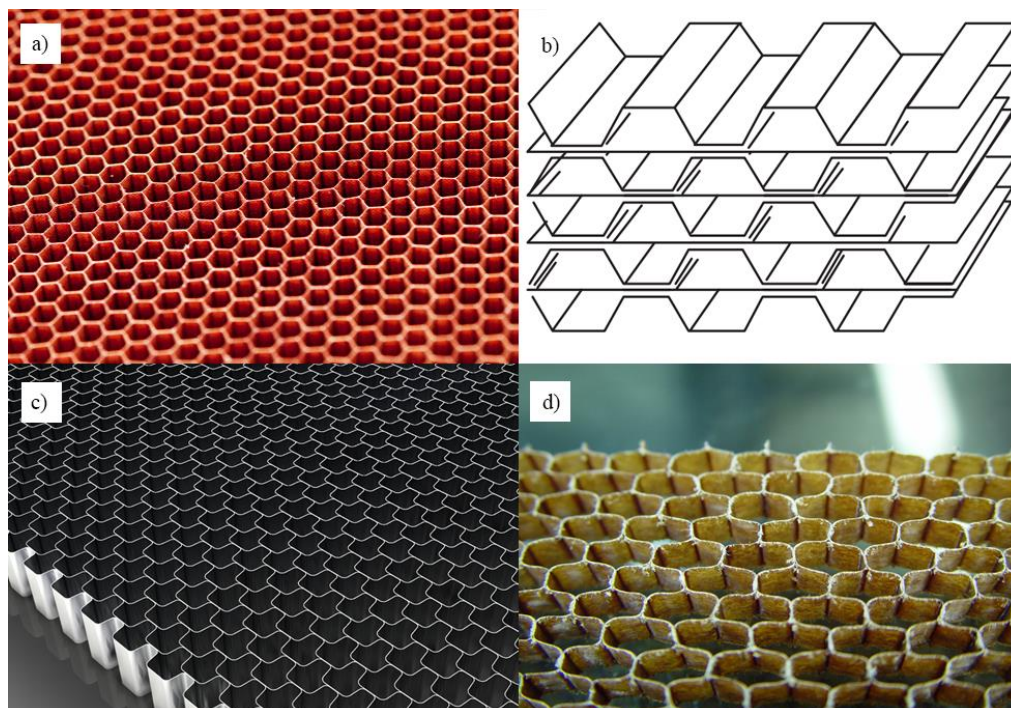
Obr. 2.14 Použití pěny Rohacell[®] u ráfků kol [30].

PS pěna

Polystyrenová pěna je nejlevnější, ale má nízké mechanické vlastnosti [3]. Uplatňuje se v konstrukci windsurfového prkna.

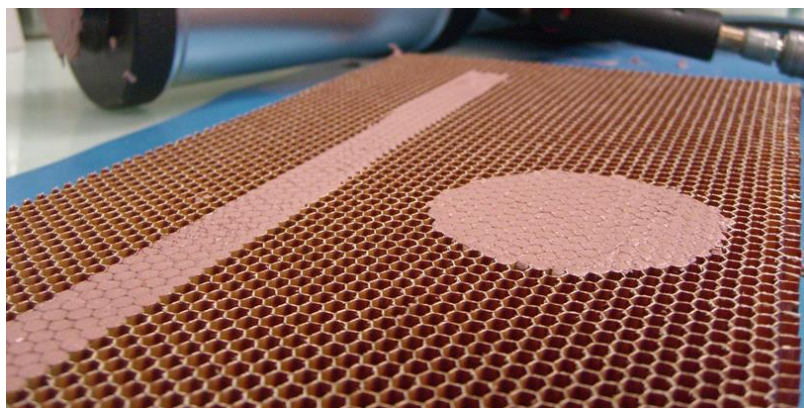
2.4.2 Voštiny

Voština má nejčastější tvar buněk hexagonální (šestiúhelník), který je podobný buňkám včelích pláství. Je to jeden z nejefektivnějších tvarů v přírodě. Voština je vyráběna v mnoha geometrických konfiguracích (viz obr. 2.15). Volba tvaru závisí na způsobu namáhání sendviče a způsobu zpracování. Také jsou dostupné v různých materiálových variacích, jako je lepenkový papír, hliník, ocel, titan, aramidové (Nomex[®], Kevlar[®]), skelné nebo uhlíkové vlákno v kombinaci určitým typem matrice.



Obr. 2.15 Příkladů geometrických tvarů voštin: a) hexagonální, b) hexagonální vyztužená, c) Flex-Core[®], d) OX-Core[®] [31], [32], [33], [34].

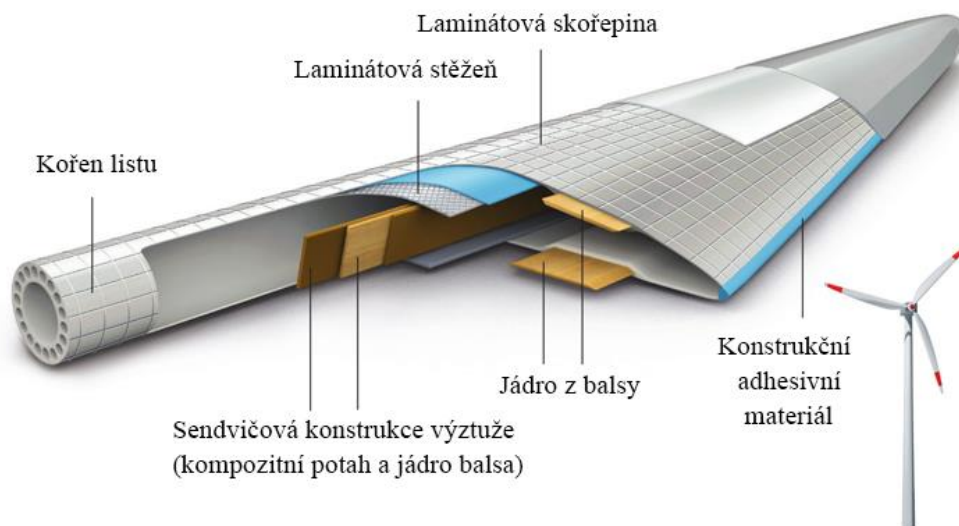
Stěny kovových voštin mohou být děrované. Buňky lze vyplnit pěnou. Poté dochází k lepšímu spojení s potahem, nárůstu mechanických vlastností a lepší akustické a tepelné izolaci (viz obr. 2.16) [25]. Hustota voštin se pohybuje od 16–880 kg/m³ [3]. Z porovnání pevností pěnových a voštinových jader vyplývá, že voštinové jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra při srovnatelné hustotě [5]. Mechanické vlastnosti závisí na tloušťce stěny buňky a materiálu. Rozsah je od papírových voštin, které mají nízkou pevnost a tuhost (domovní dveře) až po uhlíkové s vysokou pevností, vysokou tuhostí a skvělými žáruvzdornými vlastnostmi [25]. Velká tuhost voštinových sendvičů je dělá atraktivními pro aplikace, kde se vyžaduje minimální deformace součásti [15].



Obr. 2.16 Výplň voštinového jádra pěnou k lokálnímu zpevnění [35].

2.4.3 Balsa

Balsa je přírodní dřevěný produkt. Je velmi pórovitá a má nízkou hustotu ($96\text{--}288\text{ kg/m}^3$). Tvořena protáhlými uzavřenými buňkami. Má vyšší hustotu než jiné konstrukční jádra [3]. Aplikace těchto jader je v dopravním průmyslu (včetně lodí) a v listech větrných turbín (viz obr. 2.17).

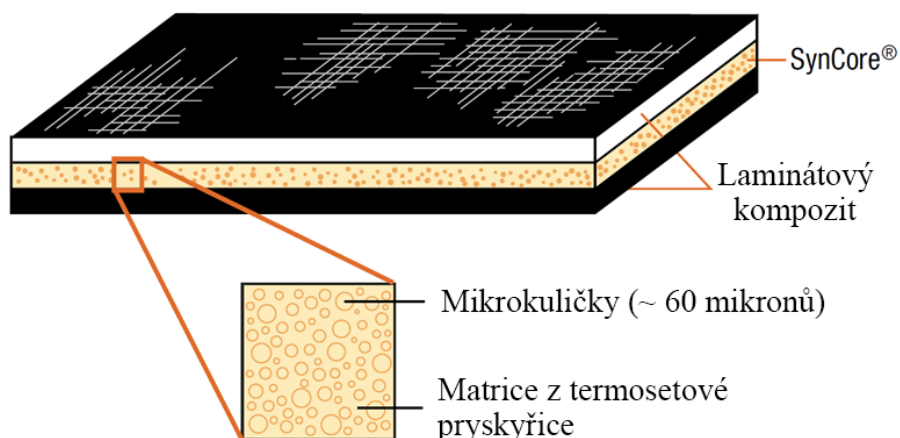


Obr. 2.17 Aplikace balsy v listech větrných turbín [36].

2.4.4 Další jádrové konstrukce

Syntaktické jádro

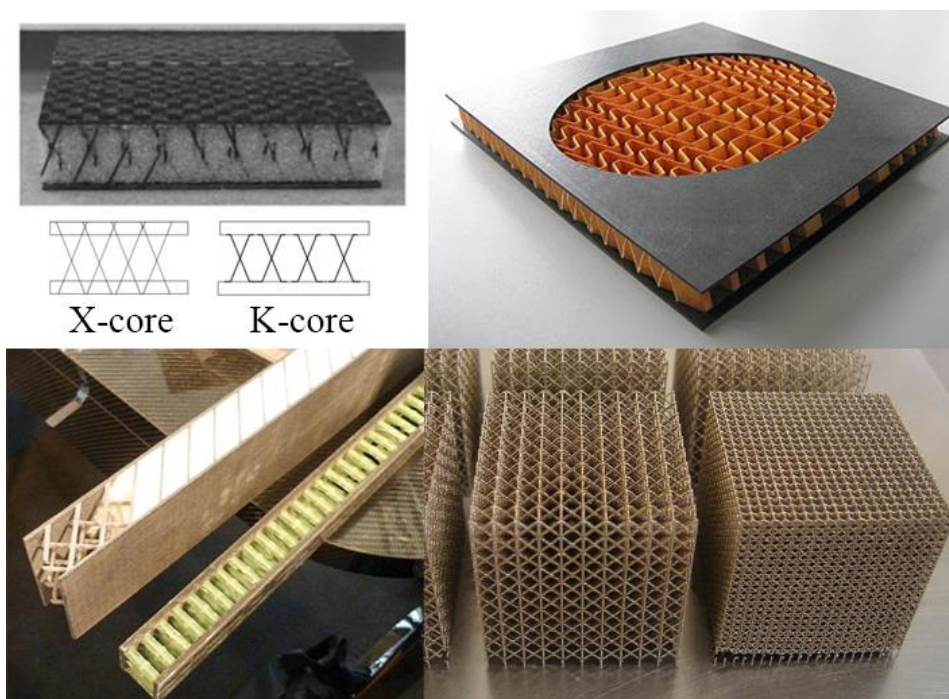
Vyskytuje se ve formě pěny. Je někdy používáno jako alternativa k voštinovému jádru, protože voštinové jádro je omezeno tloušťkou. A tak syntaktické jádro je vhodné pro tenkostěnné sendvičové konstrukce. Skládá se z matrice (např. epoxidové), která je vyplněna dutými kuličkami (skleněnými nebo keramickými). Větší hustota než u voštiny ($482\text{--}1284\text{ kg/m}^3$). Má vysokou pevnost v tlaku a tahu. Při použití tohoto jádra nevzniká zvrásnění potahů. Syntaktická pěna může sloužit jako plnivo do buněk voštin, kde předpokládáme namáhání místními tlakovými silami [3], [37].



Obr. 2.18 Schéma sendviče se syntaktickým jádrem [37].

Další možnosti konstrukcí

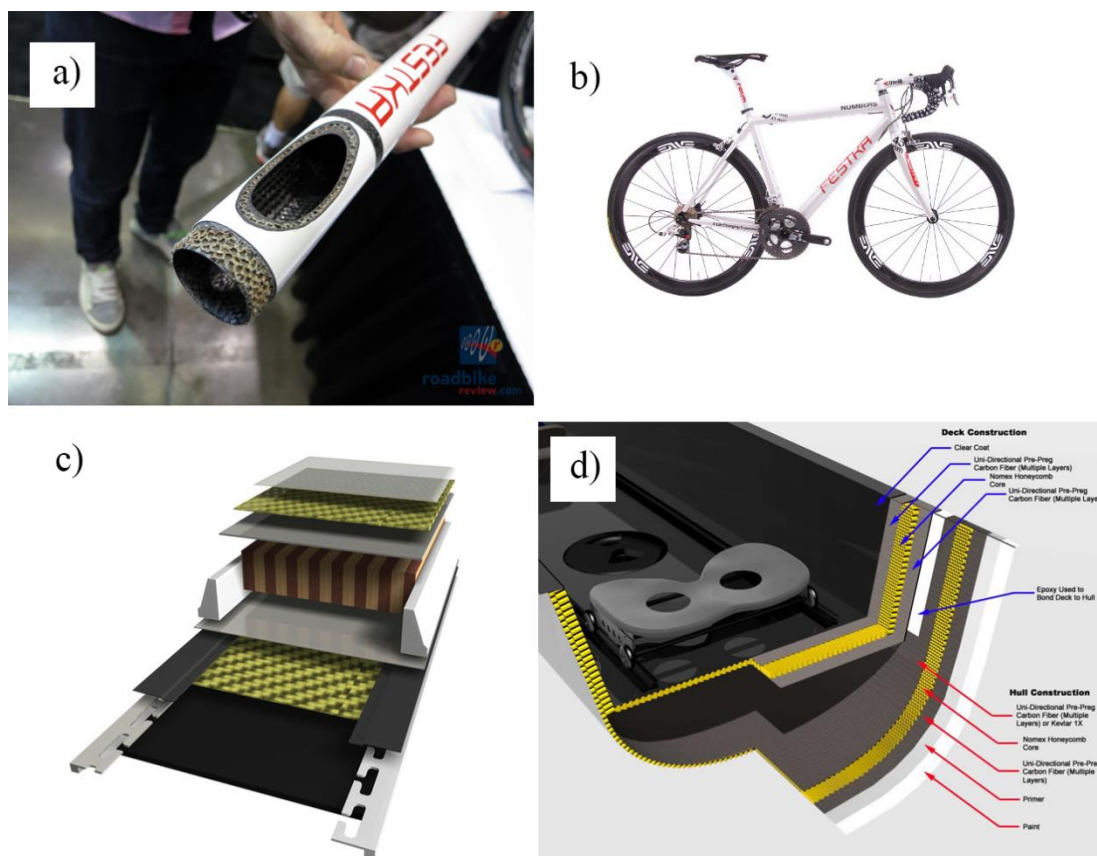
S nastupujícími technologiemi (např. Rapid Prototyping) bude možné vytvářet složitější konstrukce jádra sendviče, než doposud jsme byli schopni. Mřížkové konstrukce v kombinaci s pěnovým jádrem mohou mít vynikající mechanické vlastnosti, ale problémem je náročnost technologického zpracování a doba výroby. Zvlněné jádrové konstrukce se často používají u kartonů a plechů pro lodní průmysl.



Obr. 2.19 Ukázky dalších konstrukcí jader [38], [39], [40], [41].

2.5 Použití a vyhodnocení sendvičových struktur

Sendvičové materiály nacházejí uplatnění v mnoha oblastech průmyslu. Především tam, kde je vhodné snížit hmotnost, vyztužit konstrukci nebo další potřeby, které konvenční materiály nenabízí. Hlavní uplatnění má v leteckých a kosmických aplikacích. Dále v lodním a stavebním průmyslu, kolejové nebo automobilové dopravě. Vyskytují se v interiérech letadel, v trupech lodí atd. V budovách slouží jako tepelná a zvuková izolace. Speciální uplatnění má i ve sportovním odvětví. Sendvičové struktury se používají u konstrukce lyží, snowboardů. Jak výše bylo uvedeno, pěnové materiály se aplikují do ráfků kol ke snížení váhy a zlepšení boční tuhosti kola. Voštinové jádra se začala používat také v rámech kol, protože snižují vibrace a jako marketingový tah.



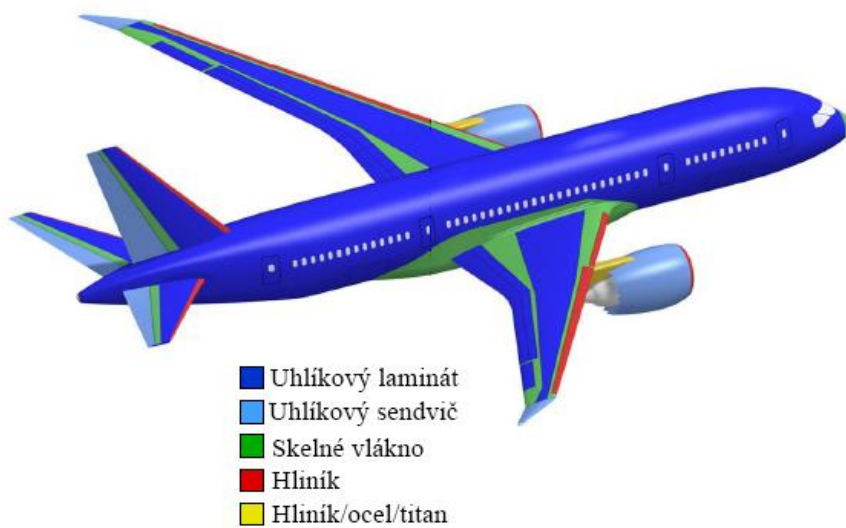
Obr. 2.20 Příklady sendvičových struktur ve sportovním odvětví: a) trubka rámu kol Festka, b) kolo Festka, c) konstrukce lyže, d) veslařská závodní loď [42], [43], [44], [45].

Výhody:

- vysoký poměr ohybové tuhosti a pevnosti k hmotnosti
- odolnost proti únavě, šíření trhlin, proti rázům
- tepelná a akustická izolace
- schopnost absorbovat energii
- vysoké vlastní frekvence
- dobrá odolnost proti teplu a ohni (záleží na volbě materiálů)
- úspora nákladů

Nevýhody:

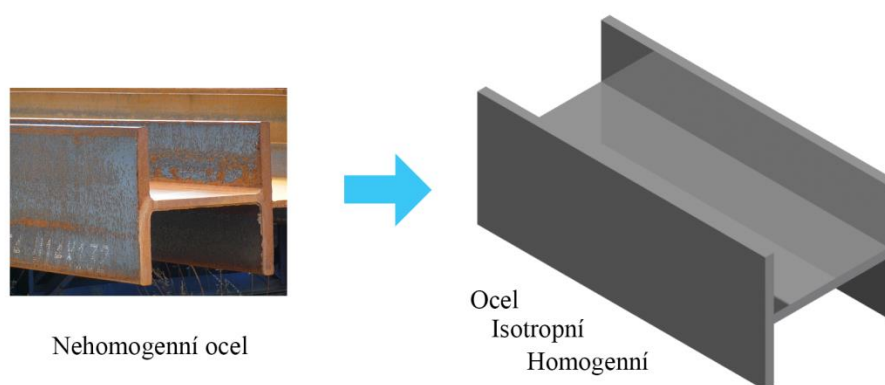
- technologické zpracování
- nutné vyztužení míst s lokálními zatíženími
- obtížná spojitelnost
- obtížná kontrola konstrukce
- nutnost znalosti návrhů kompozitních struktur



Obr. 2.21 Aplikace sendvičových struktur v letadle Boeing 787 (dole) a na solárních panelech meziplanetární sondy MAVEN [46], [47].

3 MATERIÁLOVÉ MODEL Y JÁDRA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

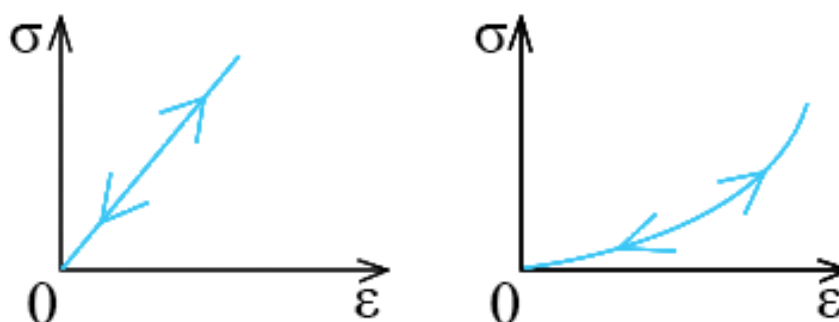
Se simulací a výpočtem deformačně-napěťové (teplotní atd.) analýzy souvisí volba vhodného materiálového modelu. Materiálový model matematicky popisuje z jakého materiálu je součást vyrobena (ocel, kompozit) a jeho charakteristické rysy (tuhost, hustota). Každý materiál má své specifické vlastnosti a chování za určitých podmínek zatěžování nebo po předchozím namáhání. Reálná součást není nikdy vyrobena ze zcela perfektního materiálu, protože může obsahovat různé vměstky, dutiny, nerovnoměrné rozložení složek (např. vláken), různé velikosti částic atd. A proto dochází, při volbě materiálového modelu, k určité idealizaci reálného materiálu. Na tento poznatek bychom neměli zapomínat při výpočtech.



Obr. 3.1 Idealizace materiálu [48].

3.1 Elastické materiálové modely

Rozlišujeme dva případy: lineární a nelineární (viz obr. 3.2).



Obr. 3.2 Rozdíl mezi lineárním (vlevo) a nelineárním (vpravo) elastickým modelem [49].

Hyperelastický model

Klasickými materiály, které lze popsat nelineárním elastickým (hyperelastickým) modelem, jsou pryž, pěna, plasty a biomateriály. Při malé síle vznikají velké elastické deformace a po odtížení se materiál vrátí do původního tvaru [50].

Lineární elastický model lze popsat Hookeovým zákonem. Deformace jsou přímo úměrné napětí (viz rovnice 3.1) [51]. Lineární elastické modely jsou:

- izotropní
- anizotropní
- ortotropní

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.1)$$

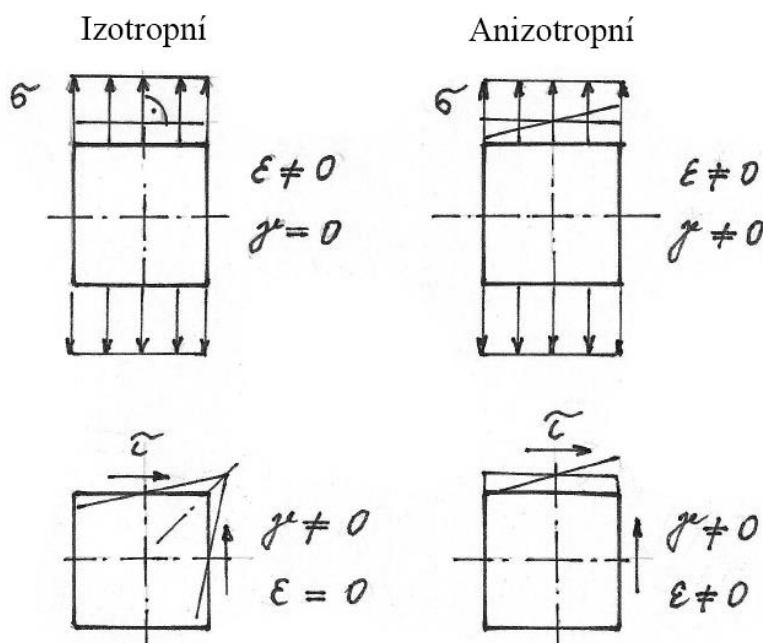
Kde ε je poměrné prodloužení, σ je napětí a E je modul pružnosti v tahu.

Izotropní lineárně elastický model

Nejjednodušší materiálový model při deformačně-napěťové analýze pružných těles. Mechanické vlastnosti materiálu nezávisí na směru. Izotropní materiál lze popsat pouze dvěma nezávislými materiálovými parametry, modulem pružnosti v tahu E a Poissonovou konstantou μ [50]. Typickým materiálem je např. ocel.

Anizotropní lineárně elastický model

Obecný případ lineárního elastického modelu. Je opakem izotropního modelu, protože v různých směrech má materiál odlišné mechanické vlastnosti. Pro správné určení anizotropního modelu je nutných 21 materiálových konstant [50]. Příkladem je válcovaný plech.



Obr. 3.3 Ilustrace chování izotropního a anizotropního materiálu [52].

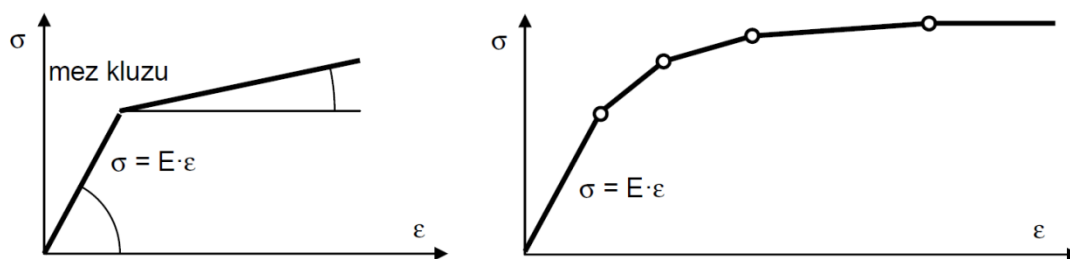
Ortotropní a lineárně elastický model

Je speciálním případem anizotropního materiálu. Tento materiálový model je charakterizován třemi osami, které jsou na sebe kolmé. Pokud působí v jejich směrech normálová napětí σ , pak způsobí pouze poměrná přetvoření a nikoliv zkos

($\gamma = 0, \varepsilon \neq 0$). Ortotropní elastický model charakterizuje 9 nezávislých materiálových konstant: $E_{11}, E_{22}, E_{33}, \mu_{12}, \mu_{13}, \mu_{23}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$. První index u Poissonových čísel reprezentuje směr působení příslušného napětí, druhý index potom označuje směr kontrakce. Ortotropní model může být obecný (3 důležité směry), transversálně ortotropní (jedna hlavní rovina) nastává u jednosměrného dlouhovláknového kompozitu a rovinný ortotropní (rovinná napjatost), který používá jako výpočtový model u tenkých vrstev kompozitů. Pro tyto modely je potřebných méně materiálových konstant než u obecného ortotropního modelu [52].

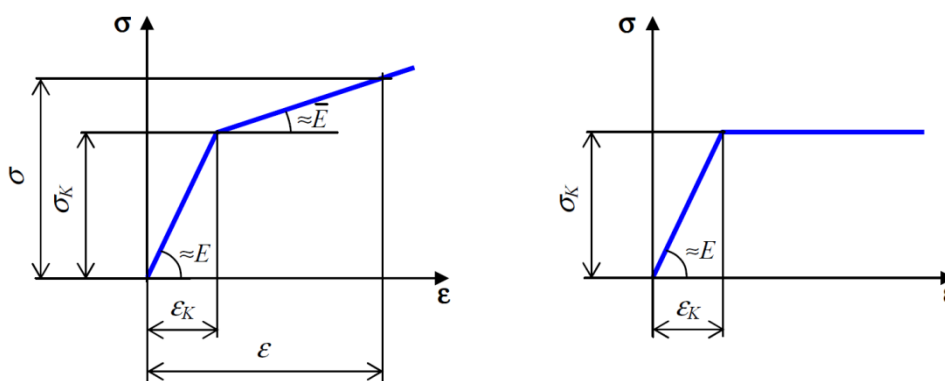
3.2 Elasticko-plastický materiálový model

Slouží jako model materiálu pro oblasti plastických deformací. Plasticita nastává při dosažení meze pružnosti (kluzu). Je to nevratná změna deformace. U trojosé napjatosti dojde k protnutí plochy plasticity v souřadném systému hlavních napětí. Tvar plochy závisí na zvolené podmínce plasticity: HMH (Von Mises) nebo $\max \tau$ (Tresca). Deformační charakteristiku lze aproximovat na bilineární a multilineární. Jde o zjednodušení reálného průběhu deformace při daném napětí [50], [51].



Obr. 3.3 Aproximace reálné deformační charakteristiky [53].

Ve většině případů po překročení meze kluzu dochází u materiálu ke zpevnění, které může být izotropní nebo kinematické (kombinované). Kinematické zpevnění se uvažuje spíše pro cyklické děje, a proto dále budeme mluvit pouze o izotropním zpevnění. V plastické oblasti dochází ke zpevnění materiálu, pak hovoříme o modelu elasticko-plastickým se zpevněním (viz obr. 3.4). Pokud nedochází ke zpevnění, je to ideálně (perfektně) elasticko-plastický materiál (viz obr. 3.4) [49], [53].



Obr. 3.4 Elasticko-plastický model se zpevněním (vlevo) a ideálně elasticko-plastický model (vpravo) [54].

3.3 Další materiálové modely

Materiálových modelů existuje celá řada. Zde byly uvedeny hlavní druhy, se kterými se nejčastěji můžeme setkat. Další mohou být: viskoelastické (uvážují relaxaci a creep), tuho-plastické a materiálové modely tekutin [51].

3.4 Materiálové konstanty

Materiálové konstanty jsou důležitou součástí při zadávání materiálových modelů ve výpočtových programech MKP. Charakterizují daný materiál. Typická konstanta je hustota, která charakterizuje hmotnost součásti v závislosti na objemu. Získávají se na základě zkoušek materiálů nebo je lze určit výpočtem z předem získaných hodnot. Každá materiálová konstanta leží v jistém rozsahu hodnot, protože žádné dva reálné materiály nejsou zcela totožné.

Základní materiálové konstanty, které charakterizují elastické chování, jsou [55]:

- modul pružnosti v tahu/tlaku E
- Poissonův poměr μ
- modul pružnosti ve smyku G
- objemový modul pružnosti K
- mez pružnosti σ_y
- mez pevnosti σ_f

Modul pružnosti v tahu/tlaku a ve smyku

Vyjadřuje tuhost materiálu, nebo také odolnost materiálu proti deformaci. Např. pro ocel je modul pružnosti v tahu $E = 210$ GPa a pro kaučuk $E = 10$ GPa [55]. Modul pružnosti ve smyku lze získat ze vztahu (pro izotropní materiál):

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3.2)$$

Poissonův poměr

Je to poměr poměrného příčného zkrácení k poměrnému podélnému prodloužení v oblasti elastických deformací [55]. Dle literatury [52] rozsah hodnot pro izotropní materiál je $\mu \in (-1; 0,5)$ a u obecného ortotropního materiálu mohou nabývat hodnot větších než 0,5, často větší než 1.

Objemový modul pružnosti

Souvisí se stlačitelností látek [55].

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (3.3)$$

Mez pružnosti a mez pevnosti

O mezi pružnosti bylo pojednáno na předchozích stránkách. Mez pevnosti je bod, kdy dojde k porušení součásti.

Další materiálové konstanty jsou tepelná roztažnost a vodivost, viskozita, vnitřní tření a další. Nutnost znalosti a potřeby konstant závisí na druhu zvoleného

materiálového modelu a typu řešené úlohy (např. pro řešení teplotní roztažnosti potřebujeme hodnotu teplotní roztažnosti daného materiálu).

3.5 Volba materiálového modelu jádra

Správné určení materiálového modelu jádra má vliv na výsledky MKP modelu sendvičové struktury. Materiály jádra byly popsány na předchozích stránkách a z vlastností lze odvodit chování materiálů jádra. Pěnové jádro je ze své podstaty zcela anizotropní materiál, ale pro náročnost získání materiálových konstant je tento druh jádra idealizován jako izotropní. V pracích [56], [57] je zachycen popis materiálového modelu PVC pěn. Jde o elasticko-plastický model se zpevněním v plastické oblasti. Charakteristika je zjednodušena jako bilineární.

Materiál voštiny lze charakterizovat do tří hlavních směrů, které jsou na sebe kolmé. Nosný směr, který se nazývá „ribbon“ (má schopnost odolávat největšímu zatížení ve smyku) a dva příčné směry [15]. Tato charakteristika lze popsat ortotropním materiálovým modelem, jak dokazují práce [58], [59].

4 ANALÝZA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

1

Část této bakalářské práce tvoří analýza sendvičových struktur metodou konečných prvků. Jsou zde porovnány různé možnosti simulace sendvičových struktur se zaměřením na rozbor vhodných materiálových modelů jádra sendviče. MKP analýza je provedena na jednoduchém vzorku laboratorní zkoušky čtyřbodového ohybu. Tvorba MKP modelu a jeho vyhodnocení byla realizována v programu MSC.Patran a výpočet proběhl v MSC.Nastran. Simulace MKP modelů jsou provedeny do oblastí elastické i plastické deformace. Řešení v plastické oblasti poskytuje lepší porovnání jednotlivých modelů a především chování jádra sendviče, které má výrazně nižší mez kluzu než potahy.

4.1 MSC.Patran/Nastran

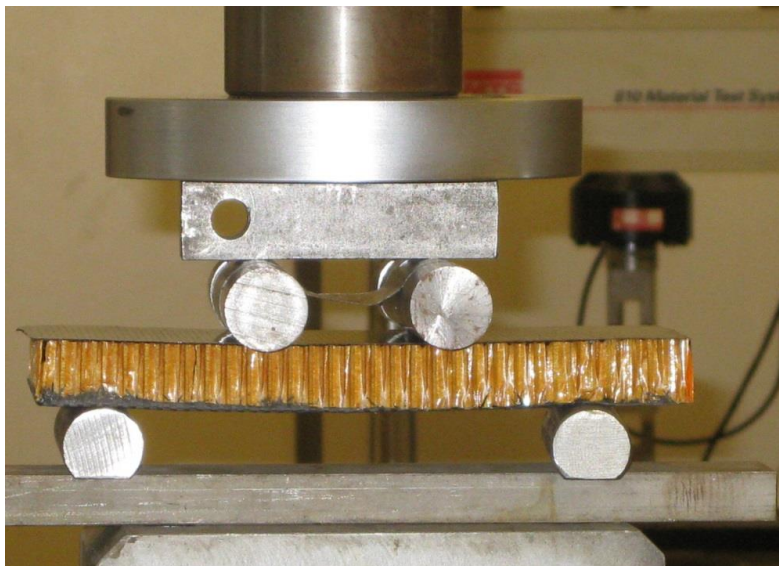
1.1

MSC.Patran je celosvětově rozšířený před/po-procesní program pro tvorbu MKP modelů, získání výsledků a jejich možné vyhodnocení. MSC.Nastran je řešič MKP s širokým oborovým zaměřením, např. strukturální, modální, lineární, nelineární analýza, dynamické úlohy a další [60].

4.2 Analyzovaný vzorek

1.1.1

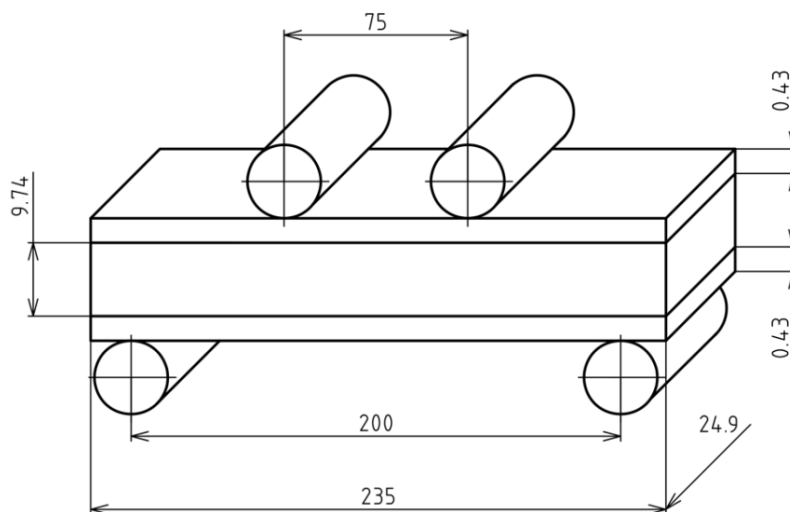
Je to vzorek používaný pro laboratorní zkoušku čtyřbodového ohybu (viz obr. 4.1). Lze jej popsat, jako nosník uložený na dvou podporách zatížený dvěma silami. Na vzorku lze snadno ukázat a porovnat vlastnosti jednotlivých MKP modelů. Druh vzorku na simulaci byl zvolen, jak pro snadnější tvorbu MKP modelu a jeho simulaci, tak pro porovnání s reálnými hodnotami.



Obr. 4.1 Ilustrovaný obrázek zkoušky čtyřbodového ohybu [61].

Reálný vzorek byl zkoušen na Leteckém ústavu, Fakulty strojního inženýrství v Brně. Hodnoty z měření mi byly poskytnuty pro porovnání s výsledky z MKP analýzy a jsou dále v grafech nazývány jako „experiment“ [62]. Rozměry vzorku a bodů dotyku jsou zobrazeny na obr. 4.2. Vzorek byl tvořen jádrem Airex C70.55 (žlutý). Potahy byly ze dvou vrstev uhlíkového kompozitu (200 g/m^2 , $0/90^\circ$). Rozměry byly zvoleny dle hodnot vzorků z měření [62]. Mechanické hodnoty

jednotlivých komponent jsou v tabulce č. 4.1, 4.2. Hodnoty materiálu jádra byly zvoleny z katalogového listu pro materiál Herex C70.55 (byly dány k dispozici) [63], které jsou srovnatelné s materiálem Airex C70.55 podle materiálového listu [64].



Obr. 4.3 Schéma vzorku a jeho rozměry.

Tab. 4.1 Hodnoty charakteristik materiálu Herex C70.55 (žlutý).

Herex C70.55	ρ	σ_d	E_d	σ_t	E_t	τ_d	G	γ
	(kg/m^3)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)
	60	0,85	58	1,3	45	0,8	22	20

Tab. 4.2 Hodnoty materiálových charakteristik uhlíkového kompozitu.

Uhlíkový kompozit (200 g/m^2)	E_{11}	E_{22}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	t_{vrstvy}	μ
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(mm)	(-)
	54 257	54 257	2600	1620	1620	0,215	0,037

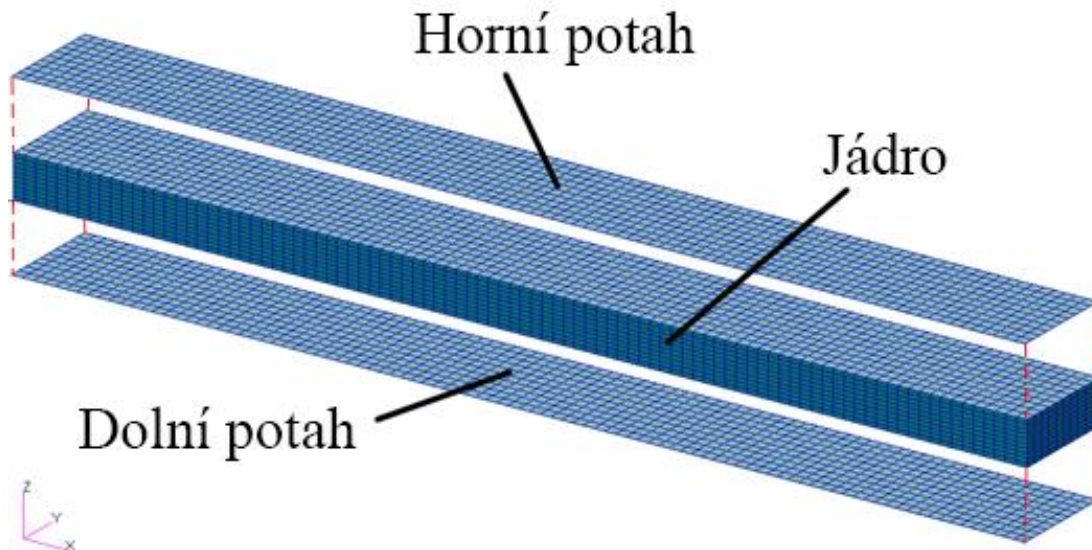
4.3 Tvorba MKP modelu

Předpoklady

Symetrie úlohy je zanedbána: jedná se o jednoduchou úlohu, z důvodu pozdějšího řešení vlivu asymetrických sil a lepší názornost. Jedním z předpokladů je dokonalé spojení jádra a potahu. Byla zanedbána hmotnost vzorku. Dalším předpokladem je mnohem vyšší tuhost potahů než jádra, a proto je chování potahů pouze elastické. Výpočet proběhl pod typem sekvence SOL106 (nelineární analýza). Konstitutivní model porušení nebyl zahrnut do výpočtů.

4.3.1 Tvorba sítě MKP modelu

Síť byla vytvořena elementy: pravidelnými čtyřúhelníky Quad4 (potahy) a pravidelnými šestistěny Hex8 (jádro). Délka elementu v podélném směru byla zvolena 2,5 mm, příčně a do hloubky byl zadán počet elementů 10.



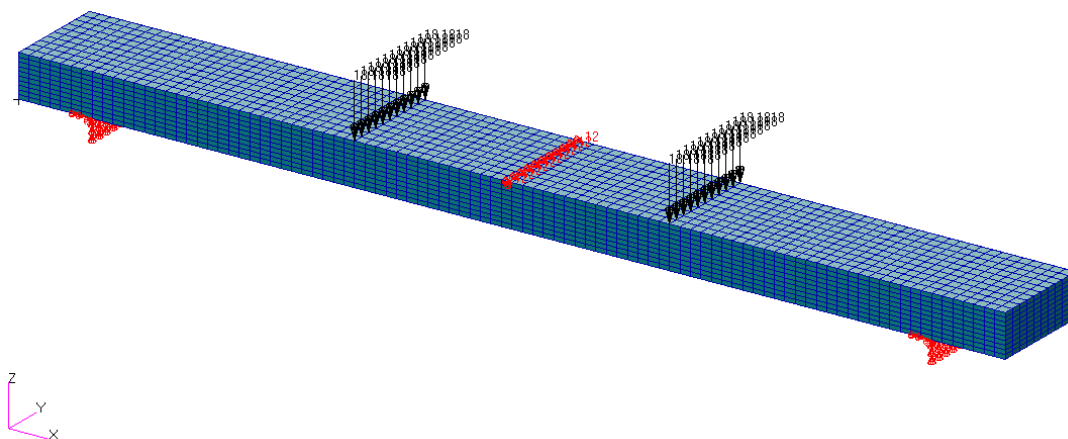
Obr. 4.4 Tvorba sítě MKP modelu.

Konvergence sítě

Kvalita sítě byla ověřena porovnáním různých typů zjemnění sítě (stejná velikost zatížení). Velikosti průhybu se lišily v řádech setin milimetru oproti zvolené jemnosti sítě, což lze považovat za dobrou konvergenci sítě.

4.3.2 Volba okrajových podmínek

Volba okrajových podmínek a zatížení je zobrazena na obr. 4.5. Zatížení (černá barva) je rozděleno do uzlů příčně a součet těchto dílčích sil je 200 N (na každé straně vzorku, pak celková síla je 400 N). Na levé i pravé podpoře (červená barva, dolní část) je omezen posuv ve směru osy Z, Y a rotace kolem osy X, Z. Posuv v ose X je omezen vazbou uprostřed modelu (červená barva, horní část), jak je zobrazeno na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Volba okrajových podmínek.

4.3.3 Volba materiálových modelů

Potahy jsou ze dvou tenkých vrstev uhlíkového kompozitu, a proto byl materiálový model, každé vrstvy, zvolen jako 2D ortotropní lineárně elastický. Materiálové konstanty byly zadány z tab. 4.2. Dále byl vytvořen model vrstvený kompozit zhotovený ze dvou vrstev výše uvedeného kompozitu o celkové tloušťce 0,43 mm.

Materiálový model jádra je hlavním cílem rozboru pomocí MKP analýzy. Herex C70.55/Airex C70.55 je PVC pěna s uzavřenými buňkami. Chování materiálu bylo zadáno jako izotropní. Materiálový model byl charakterizován obecně jako elasticko-plastický. Přesnější charakteristika je doplněna samostatně v řešených modelech, podobně možné změny v materiálovém modelu. Materiálové konstanty jsou určeny z tab. 4.1.

4.3.4 Vlastnosti elementů

Horní potah:

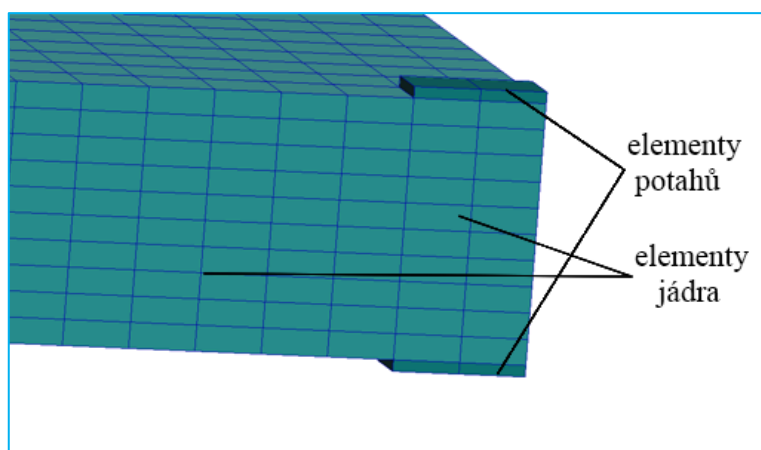
- tvořen elementy Quad4
- vlastnost elementů – skořepina
- charakteristika tenkého laminátu
- materiálem je vrstvený uhlíkový kompozit
- posuv 0,215 mm

Jádro:

- tvořeno elementy Hex8
- vlastnost elementů – těleso
- charakteristika homogenní
- materiálem je Herex C70.55

Dolní potah:

- tvořen elementy Quad4
- vlastnost elementů – skořepina
- charakteristika tenkého laminátu
- materiálem je vrstvený uhlíkový kompozit
- posuv 0,215 mm



Obr. 4.6 Kontrola vymezení prvků potahů.

4.4 Vliv chování při změně materiálových charakteristik

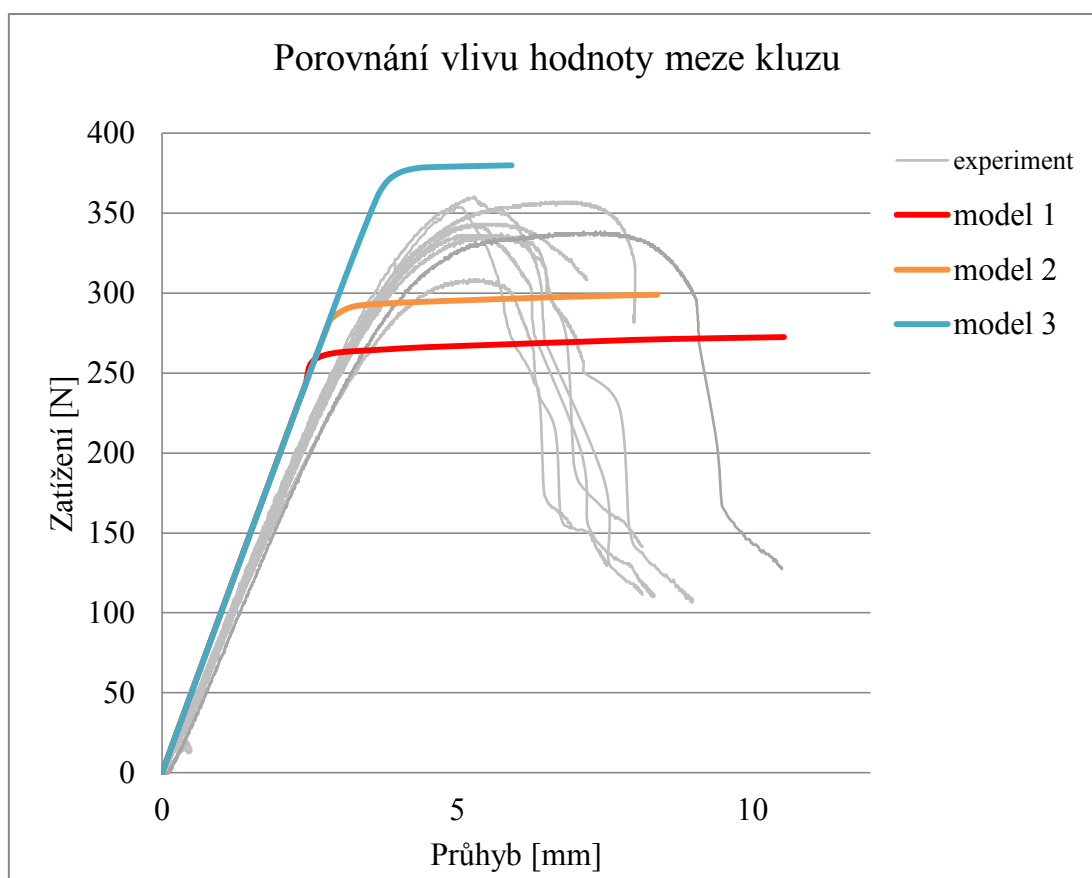
V této části jsem se zaměřil na chování MKP modelu při změnách mechanických konstant jádra sendviče.

4.4.1 Hodnota meze kluzu σ_y

Vliv na deformační charakteristiku může mít změna hodnoty meze kluzu. MSC.Patran nabízí několik kritérií meze kluzu. Von Mises a Tresca jsou klasická kritéria pro mez kluzu. Mohr-Coulombovo kritérium slouží pro materiály, které jsou křehké a s rozdílnými tahovými a tlakovými vlastnostmi [65]. Model Drucker-Prager je vhodný pro simulování chování písku a šterku [66]. Pro tento případ byl zvolen model ideálně elasticko-plastický a kritérium je přednastavené jako Von Mises.

Tab. 4.3 Hodnoty mechanických konstant jádra, především meze kluzu.

	σ_y [MPa]	E [MPa]	G [MPa]
model 1	0,9	58	22
model 2	1,0	58	22
model 3	1,3	58	22



Obr. 4.7 Porovnání vlivu hodnoty meze kluzu.

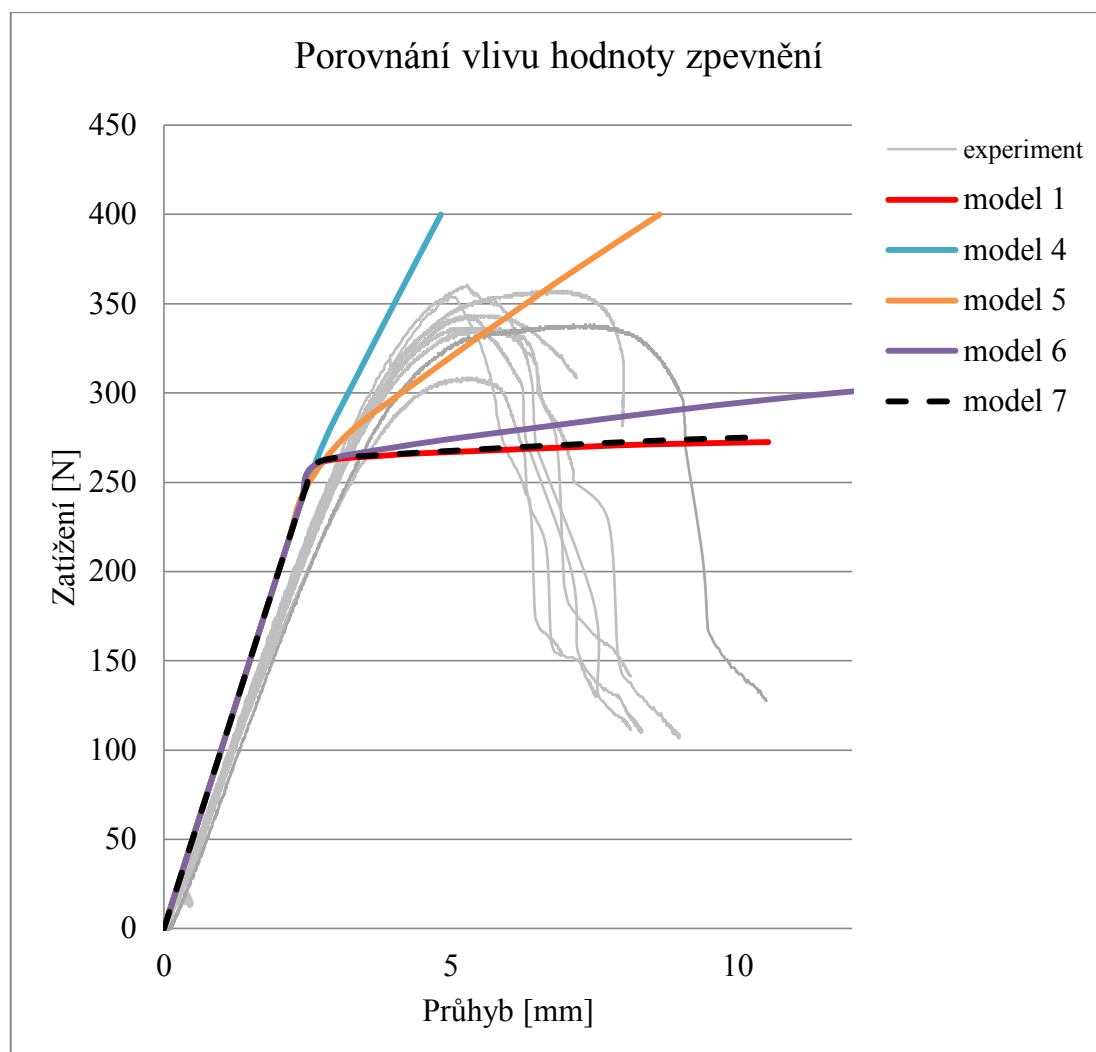
Z obr. 4.7 můžeme pozorovat změny, které způsobí hodnota meze kluzu jádra. Se zvyšující se mezí kluzu dochází k růstu hodnoty, při které se vzorek začne značně deformovat bez nárůstu potřebné síly.

4.4.2 Hodnota zpevnění HS

U materiálu jádra může docházet k jeho zpevnění. Tato úloha je zaměřená na vliv hodnoty zpevnění na chování sendvičového vzorku. Materiálový model je elasticko-plastický s izotropním zpevněním. Hodnoty modulu pružnosti v tlaku a ve smyku jsou zachovány. Hodnota kluzu je podle modelu 1 a kritérium přednastavené Von Mises.

Tab. 4.4 Hodnoty mechanických konstant jádra, především izotropního zpevnění.

	HS [MPa]	σ_y [MPa]	E [MPa]	G [MPa]
model 1	0	0,9	58	22
model 4	58	0,9	58	22
model 5	10	0,9	58	22
model 6	1	0,9	58	22
model 7	0,1	0,9	58	22



Obr. 4.8 Porovnání vlivu hodnoty zpevnění.

Velikost zpevnění jádra sendviče má vliv na celkové zpevnění vzorku sendviče v plastické oblasti. Pro malé hodnoty zpevnění ($HS = 0-1$ MPa) lze zpevnění

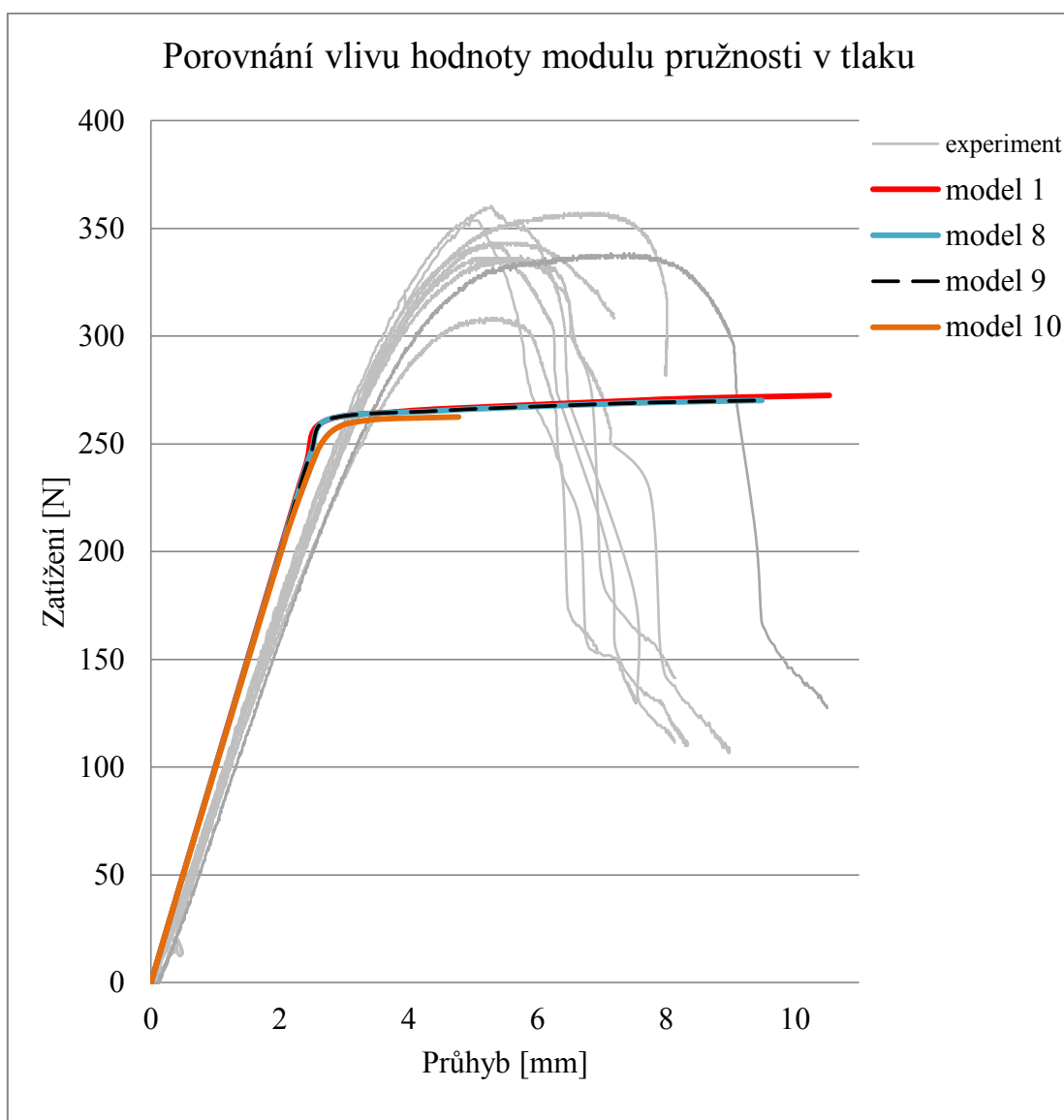
materiálu zanedbat. Pro ideálně elasticko-plastický materiál (model 1) je hodnota zpevnění $H_S = 0$ MPa. Na multilineární model je nutné vytvořit tabulku jednotlivých úseků křivky, které charakterizují deformačně-napěťovou křivku [67].

4.4.3 Hodnota modulu pružnosti v tlaku

Pro zkoušení MKP modelů s různými hodnotami modulu pružnosti v tlaku byl zadán materiálový model ideálně elasticko-plastický s konstantní mezí kluzu (Von Mises).

Tab. 4.5 Hodnoty mechanických konstant jádra, především modulu pružnosti v tlaku.

	E [MPa]	μ [-]	σ_y [MPa]	G [MPa]
model 1	58	0,318	0,9	22
model 8	50	0,136	0,9	22
model 9	44	0	0,9	22
model 10	30	-0,318	0,9	22



Obr. 4.9 Porovnání vlivu hodnoty modulu pružnosti v tlaku.

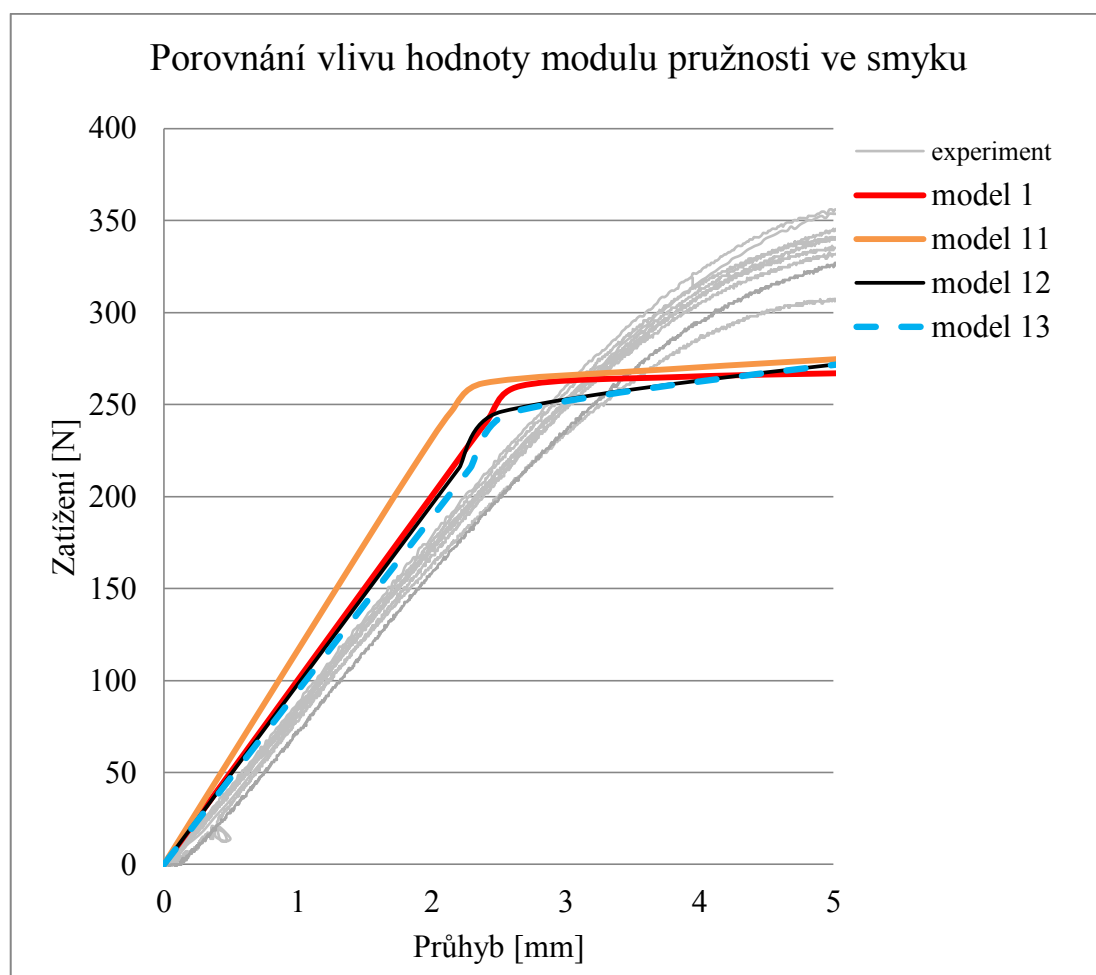
Z výsledků lze říct, že modul pružnosti v tlaku nemá žádný vliv na tuhost sendviče v oblasti elastické. V oblasti plastické už začíná nepatrně ovlivňovat tuhost, ale až při nízké hodnotě modulu pružnosti v tlaku.

4.4.4 Hodnota modulu pružnosti ve smyku

Stejně podmínky jako u předchozího řešení, ale modul pružnosti je konstantní.

Tab. 4.6 Hodnoty mechanických konstant jádra, především modulu pružnosti ve smyku.

	G [MPa]	E [MPa]	μ [-]	σ_y [MPa]
model 1	22	58	0,318	0,9
model 11	30	58	-0,033	0,9
model 12	21	58	0,381	0,9
model 13	19,5	58	0,487	0,9



Obr. 4.10 Porovnání vlivu hodnoty modulu pružnosti ve smyku.

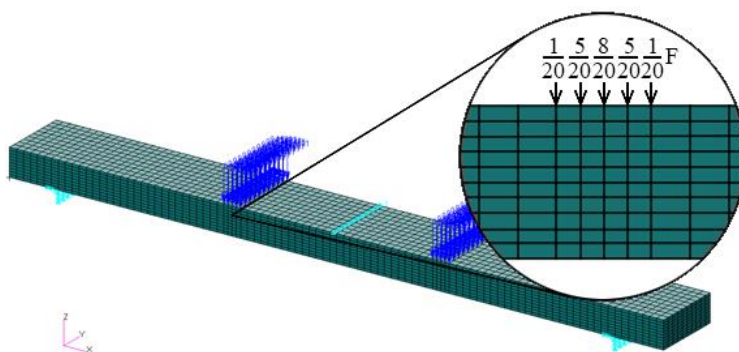
Z obr. 4.10 je patrné, že hodnota modulu pružnosti ve smyku má značný vliv na tuhost sendvičového vzorku i při nepatrných změnách oproti případu, kde se hodnotil modul pružnosti v tlaku. A v oblasti meze kluzu dochází ke změnám hodnoty meze kluzu vzorku. Možná to způsobuje konvergence při řešení sekvenční SOL106.

4.5 MKP analýza vlivů zkoušky na materiálový model

Věrohodnost výsledků ovlivňují také chyby, které vznikají při zkoušce. A proto jsem se zaměřil na vliv rozložení napětí pod zatížením a na stav asymetrie sil.

4.5.1 Vliv rozložení napětí pod zatížením

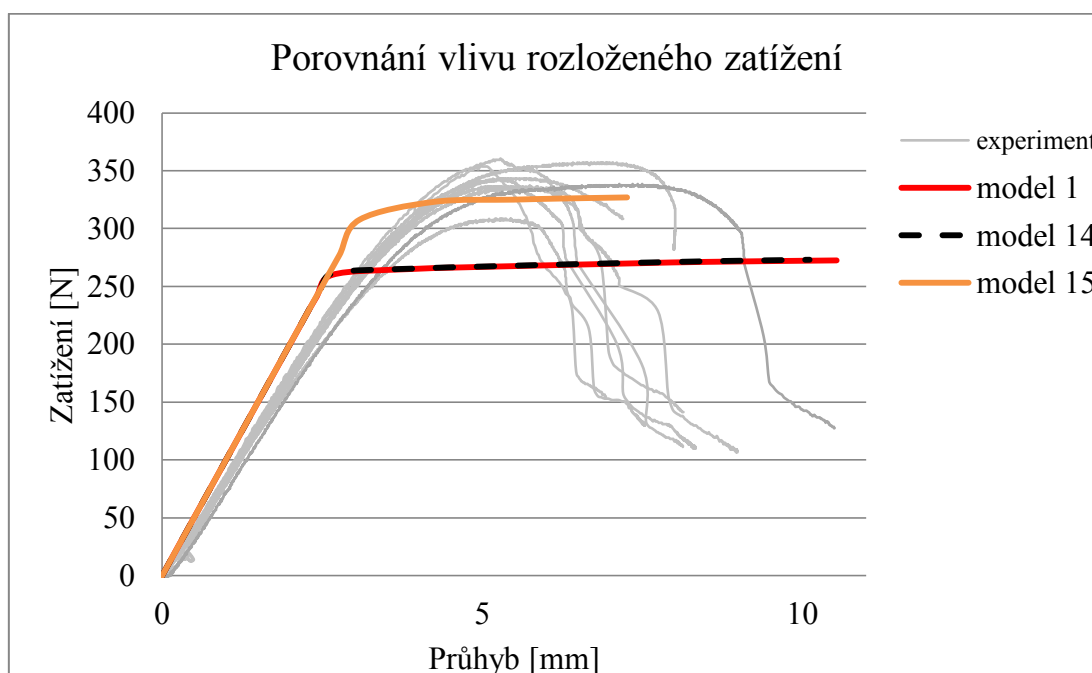
Zatížení pod zatěžujícími podporami způsobovalo rozložené namáhání. Tento druh namáhání mohl mít vliv na deformační charakteristiku. Síť MKP modelu byla upravena pro vytvoření přibližné simulace rozloženého namáhání (viz obr. 4.11). Materiálový model byl ideálně elasticko-plastický. Vzdálenost mezi uzly je 1,5 mm (ve zjemněné části). Model 1, zobrazený v grafu, slouží pouze pro porovnání.



Obr. 4.11 Schéma zjemnění sítě a rozložení zatížení po jednotlivých uzlech.

Tab. 4.7 Hodnoty mechanických konstant jádra.

	E [MPa]	G [MPa]	σ_y [MPa]
model 14	58	22	0,9
model 15	58	22	1,1



Obr. 4.12 Porovnání vlivu rozloženého napětí pod zatěžujícími podporami.

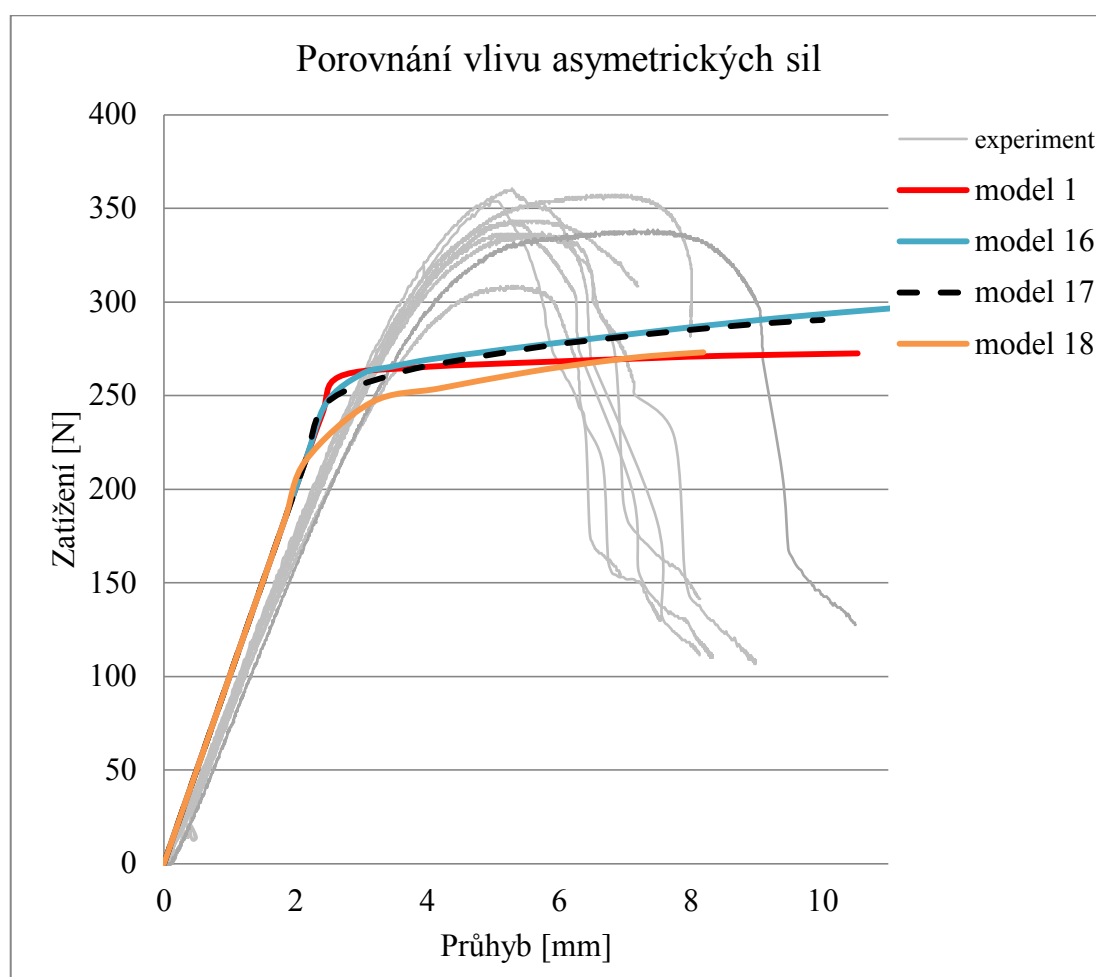
Tento případ ukazuje, že rozložené napětí nemusí mít vliv na charakteristiku deformace.

4.5.2 Vliv asymetrického zatížení

Asymetrické zatížení může vznikat účinkem nepřesností v měřicím stroji nebo rozdílnou deformací pod zatěžujícími podporami. Charakteristiky materiálového model zůstávají jako v předchozím případě. Změna v MKP modelu je pouze u velikosti jednotlivých sil. Síť MKP modelu má původní strukturu.

Tab. 4.8 Hodnoty mechanických konstant jádra a velikosti zatěžujících sil.

	F_L [N]	F_P [N]	E [MPa]	G [MPa]	σ_v [MPa]
model 16	210	190	58	22	0,9
model 17	220	180	58	22	0,9
model 18	250	150	58	22	0,9



Obr. 4.13 Porovnání vlivu vzniku asymetrických sil.

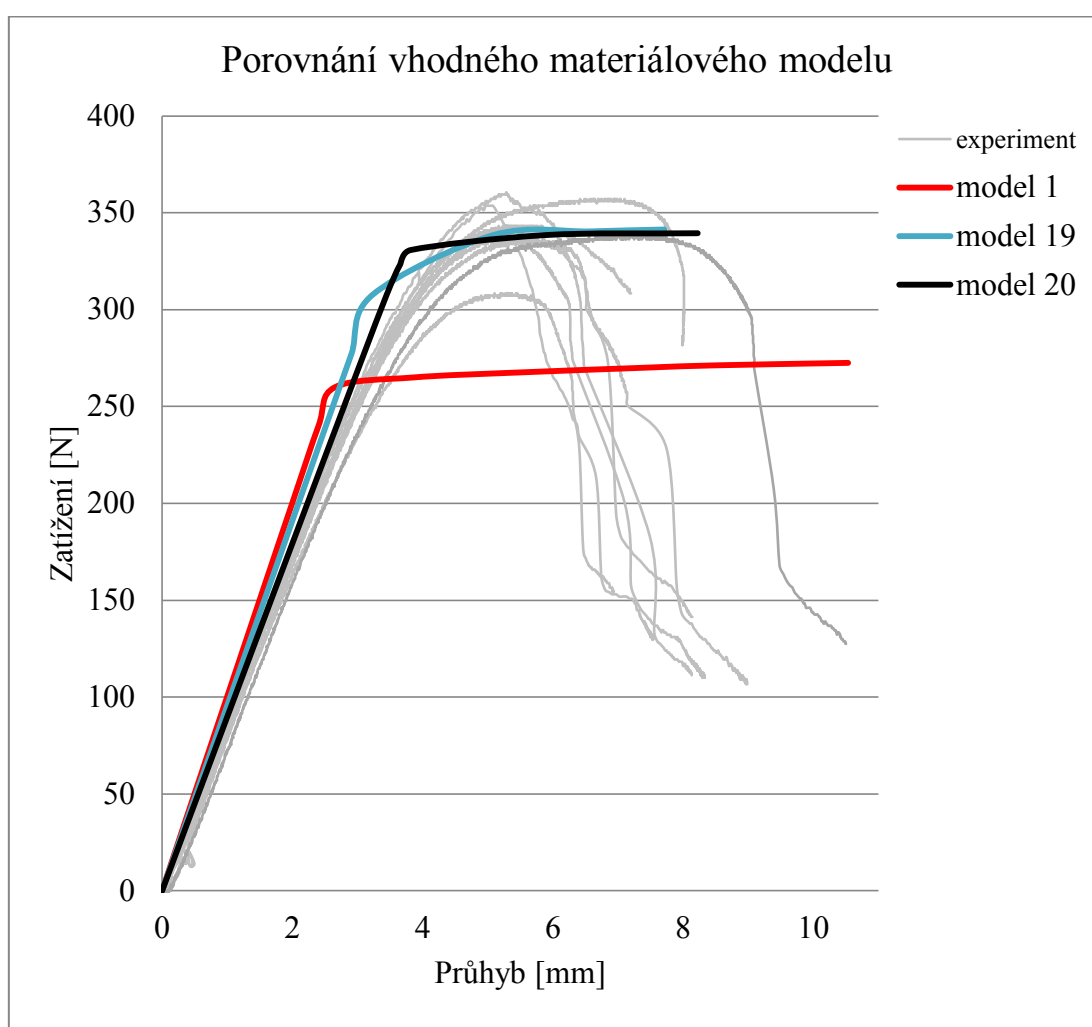
Vznik asymetrického zatížení může mít dopad na chování vzorku sendviče. Na elastickou část to nemělo vliv. Plastická část se měnila s odlišností symetrie sil. V materiálu docházelo ke zpevnění oproti symetrickému zatížení.

4.6 Odpovídající materiálový model

Ze znalostí získaných z jednotlivých MKP modelů jsem vytvořil modely, které mohou odpovídat reálnému sendvičovému jádru vzorku. Materiálový model byl určen jako ideálně elasticko-plastický. Protože hodnota meze kluzu není určena v materiálových listech, tak jsem volil střední hodnotu meze pevnosti tahu []. Hodnotu meze pevnosti v tahu volím dle doporučení z příručky []. A hodnotu modulu pružnosti jsem vybral jako nejnižší hodnotu v materiálovém listu []. Hodnotu modulu pružnosti v tlaku jsem zadával s ohledem na velikost Poissonovy konstanty.

Tab. 4.9 Hodnoty mechanických konstant jádra.

	E [MPa]	G [MPa]	μ [-]	σ_y [MPa]
model 19	58	20	0,45	1,15
model 20	50	18	0,38	1,15



Obr. 4.14 Porovnání vhodného materiálového modelu.

Materiálový model 19, 20 odpovídá reálnému jádru sendvičového vzorku, ale s určitou chybou.

5 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce je zaměřena na rozbor materiálového modelu jádra sendvičových struktur. Tento rozbor byl proveden MKP simulací jednoduchého vzorku zkoušky čtyřbodového ohybu. Porovnání výsledků, ze zkoušky a z MKP analýzy, bylo provedeno pomocí grafů deformačních charakteristik.

Pro řešení této bakalářské práce bylo nutné získat základní znalosti v programech MSC.Patran/Nastran a aplikování znalostí z předchozího bakalářského studia.

Sendvičové struktury bylo nutné charakterizovat, a tak první část této práce je zaměřena na vlastnosti sendvičových struktur a jednotlivých komponent. Problematika materiálových modelů je popsána na vybraných nejčastěji používaných materiálových modelů. Jsou zde popsány dvě možnosti aplikace materiálových modelů na sendvičových jádrech.

V závěru práce se zabývám analýzou sendvičových struktur. Simulace byly provedeny pomocí MKP v prostředí MSC.Patran a výpočet proběhl v MSC.Nastran. Pro řešení chování materiálových modelů byly vytvořeny MKP modely sendvičového vzorku zkoušky čtyřbodového ohybu. V analýze šlo především o rozbor jádra sendvičové struktury. Jádrem sendvičového vzorku byla PVC pěna. Ze získaných znalostí byl materiálový model idealizován jako izotropní elasticko-plastický. Pak byla provedena simulace jednotlivých vybraných případů. Z výsledků lze stanovit, že největší vliv na chování měla velikost modulu pružnosti ve smyku (vliv tuhosti) a hodnota meze pružnosti. Nejmenší vliv na chování měla velikost hodnoty modulu pružnosti v tlaku a vliv rozloženého napětí pod zatěžujícími podporami. Nakonec byl vytvořen vhodný materiálový model s charakteristikami, které byly zvoleny z rozsahu hodnot materiálových.

Metoda konečných prvků nám poskytuje možnost předvídat chování jednotlivých materiálů. Je nutné si uvědomit, že je to pouze aproximační metoda. Proto bude vždy potřeba přistupovat k výsledkům s určitou rezervou a ověřovat výsledky na reálných součástech.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

z		- počet zubů ozubeného kola
Qn [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]		- jmenovitý průtok čerpadla
nn [s^{-1}]		- jmenovitá frekvence otáček
Yn [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]		- měrná energie člověka
ψ		- součinitel poměrné výšky ozubení
η_v		- objemová účinnost
2D		dvoudimenzionální prostor
b	[mm]	šířka sendvičového vzorku
C		uhlík
D	[Nmm^2]	tuhost sendvičové struktury
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
E_{11}	[MPa]	modul pružnosti v tahu ve směru 1
E_{22}	[MPa]	modul pružnosti v tahu ve směru 2
E_{33}	[MPa]	modul pružnosti v tahu ve směru 3
E_c	[MPa]	modul pružnosti v tahu jádra sendvičové struktury
E_d	[MPa]	modul pružnosti v tlaku
E_f	[MPa]	modul pružnosti v tahu potahů sendvičové struktury
E_t	[MPa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	síla
F_L	[N]	síla na levé podpoře
F_P	[N]	síla na pravé podpoře
G	[MPa]	modul pružnosti ve smyku
G_{12}	[MPa]	modul pružnosti ve smyku v rovině 12
G_{13}	[MPa]	modul pružnosti ve smyku v rovině 13
G_{23}	[MPa]	modul pružnosti ve smyku v rovině 23
G_c	[MPa]	modul pružnosti ve smyku jádra
h	[mm]	hloubka sendviče
HS	[MPa]	hardening slope = hodnota zpevnění
K	[MPa]	objemový modul pružnosti
l	[mm]	vzdálenost podpor
MKP		metoda konečných prvků
PMI		polymetakrylid
PP		polypropylen
PS		polystyren
PVC		polyvinylchlorid
PUR		polyuretan
t_c	[mm]	hloubka jádra
t_f	[mm]	tloušťka potahů
t_{vrstvy}	[mm]	tloušťka vrstvy
UV		ultrafialové
SiC		karbid křemíku
γ	[-]	poměrné zkosení
δ	[mm]	deformace
δ	[mm]	deformace
δ_{ohyb}	[mm]	ohybová složka deformace
δ_{smyk}	[mm]	smyková složka deformace

ε	[-]	Poměrná deformace
μ	[-]	Poissonova konstanta
σ	[MPa]	napětí
σ_d	[MPa]	mez pevnosti v tlaku
σ_f	[MPa]	mez porušení
σ_t	[MPa]	mez pevnosti v tahu
σ_y	[MPa]	mez kluzu

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CALLISTER, William D. a David G. Rethwisch. *Materials science and engineering: An Introduction*. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2010, 885 s. ISBN 978-0-470-41997-7
- [2] ROCCA, S. V. a A. Nanni. Mechanical Characterization of Sandwich Structure Comprised of Glass Fiber Reinforced Core: Part 1. In: *Composites in Construction 2005 – Third International Conference*. Lyon, 2005. Dostupné z: <http://transportation.mst.edu/media/research/transportation/documents/P-3.pdf>
- [3] MIRACLE, Daniel B. a Steven L. Donaldson. *ASM Handbook: Volume 21 – Composites*. Ohio: ASM International, 2001. 1201 s. ISBN 0-87170-703-9
- [4] THOMSEN, O. T., BOZHEVOLNAYA E., LYCKEGAARD A. *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials: Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 29-31 August 2005*. Dordrecht (Nizozemsko): Springer, 2006. 1054 s. ISBN 978-1-4020-3848-8
- [5] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Sendvičové konstrukce. www.mmspektrum.com. [online]. ©2001 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [6] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143s. ISBN 978-80-01-04167-3
- [7] Obrázek [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf
- [8] HEXCEL COMPOSITES. *HexWeb™ HONEYCOMB SANDWICH DESIGN TECHNOLOGY* [online]. Hexcel Composites, ©2000 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf
- [9] Obrázek [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.factechology.com/wp-content/uploads/2014/04/ibeam-sandwich.png>
- [10] RIKARDS, Rolands. *Analysis of Laminated Structures: Course of Lectures*. Riga: Riga Technical University, 1991, [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://icas.bf.rtu.lv/doc/R61.pdf>
- [11] DIAB GROUP. DIAB Guide to Core and Sandwich. [online]. Laholm (SWE), ©2012, rev. 1 prosinec 2012, [cit 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.diabgroup.com/~media/Files/Manuals-Guides/DIAB-guide-to-Core-and-sandwich_P1r2-locked.pdf
- [12] SAND.CORE. *Best Practise Guide for Sandwich Structures in Marine Application* [online]. NewRail: University of Newcastle upon Tyne. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201302/20130201_105501_16344_RevisedBPGv1-00---Report-Format.pdf
- [13] Thermal Management. WADLEY RESEARCH GROUP, University of Virginia, School of Engineering and Applied Science. [online]. 2013-04- 24 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/thermal-management.html>
- [14] Sendvičové panely. 5M S.R.O. [online]. [cit. 2014-05-16]. Obrázek ve tvaru JPEG. Dostupné z: <http://www.5mslovakia.sk/sendviovce-panely>

- [15] NIU, Michael Chun-Yung. *Composite airframe structures: practical design information and data*. 1th published. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press Ltd, 1992, 664 s. ISBN 96-271-2806-6.
- [16] KOŘÍNEK, Zdeněk. *KOMPOZITY - Ing. Zdenek Korinek, CSc* [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [17] LAŠ Vladislav. *Úvod do modelování v mechanice: mechanika kompozitních materiálů – I* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/229-umm-6.pdf>
- [18] GRM SYSTEMS s.r.o. *Product book* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.grm-systems.cz/sites/default/files/download/GRM_katalog_web_2014.pdf
- [19] VĚCHET, Stanislav. Úvod do materiálových věd a inženýrství. *Kompozity*. [prezentace]. Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně. In: Ústav materiálových věd a inženýrství [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/bum/prednasky/11-BUM%20-%20kompozitni%20materialy.pdf>
- [20] FRANCES I., Hurwitz. Improved Fabrication of Ceramic Matrix Composite/Foam Core Integrated Structures. [online]. August 2009, s. 1 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090029266.pdf>
- [21] Marvel Bioresin. MARVEL GMBH. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.marvel-display.de/>
- [22] MARVEL BIORESIN. In: *Adream 2012: Architecture and design using renewable and ecological materials* [online]. 2012. vyd. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.adream2012.eu/sites/default/files/styles/large/public/material/3_d.jpg
- [23] A4A Design: Original design cardboard modular bookcase. VIRTUALEXPO GROUP. [online]. [cit. 2014-05-16]. Obrázek ve tvaru JPEG. Dostupné z: <http://www.archiexpo.com/prod/a4a-design/original-design-cardboard-modular-bookcases-63222-1053799.html>
- [24] MEYRIC-HUGHES, Steffan. Plywood foam sandwich is an incredibly light build method. In: *Classic Boat Magazine* [online]. 2014-01-09. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.classicboat.co.uk/articles/boat-test-pebbles-3-4-radical-new-wooden-motorboat/attachment/construction/>
- [25] CRIPPS, David, Chris O'CONNELL, Mark NOONAN a Martin ORME. SP SYSTEMS. *Composite Materials Handbook* [online]. Newport: SP Systems, ©1998 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.bolton.ac.uk/CODATE/SPHandbook.pdf>
- [26] *Acta astronautica: Aluminium foam sandwich structures for space applications* [online]. June–August 2007 [cit. 2014-05-22]. ISSN 0094-5765. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576507000513>
- [27] 3AComposites Core Materials. AIREX AG. [online]. ©2014 [cit. 2014-05-23]. Obrázek ve tvaru JPEG. Dostupné z: http://www.3accorematerials.com/uploads/pics/www_AIREX_C71.75_GP_0003_08.jpg
- [28] VCELKA, Martin, Michelle DUNN, Yvonne DURANDET, Christopher C. BERNDT a Dong RUAN. Behavior of CFRC/Al Foam Composite Sandwich

- Beams under Three-Point Bending. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2014, vol. 16, issue 1, s. 9-14 [cit. 2014-05-23]. DOI: 10.1002/adem.201300055. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.201300055/abstract>
- [29] EVONIK INDUSTRIES AG. *Earning the Yellow Jersey Made Easy* [online]. Essen: Evonik Industries AG, July 10, 2009 [cit. 2014-05-20]. Product Story, No. 23. Dostupné z: <http://www.rohacell.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/ROHACELL/ProductStories/Product%20Story%20ROHACELL%20009-07-10%20Earning%20the%20Yellow%20Jersey%20Made%20Easy.pdf>
- [30] Obrázek [online]. [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://a142.idata.over-blog.com/0x0-000000/0/02/72/10/lightweight/lightweight-rim-cut.jpg>
- [31] Obrázek [online]. [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.bmedesign.eu/images/honeycomb.jpg>
- [32] HEXCEL COMPOSITES. *HexWeb™ Honeycombs: Selector Guide* [online]. Hexcel Composites, ©2009 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/SelectorGuides/Honeycomb_Selector_Guide.pdf
- [33] Obrázek [online]. [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://grabcad.com/library/flexcore-honeycomb-core-1>
- [34] Obrázek [online]. [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://lessconversationmoreaction.files.wordpress.com/2011/05/honeycomb.jpg>
- [35] Obrázek [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://solutions.3m.com.sg/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1317374488000&locale=en_SG&assetType=MMM_Image&assetId=1273696068099&blobAttribute=ImageFile
- [36] Plastics for giant rotor blades: Polyethurane: Greater efficiency for wind turbines. *Bayer research* [online]. 2013, roč. 2013, č. 25, s. 1 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: http://www.research.bayer.com/en/homepage.aspx?showapp=article-windkraft_eng.html
- [37] HENKEL CORPORATION. *SynCore® Design Guide: An Aerospace Technology Guide* [online]. Bay Point, 2006 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: http://www.loctite.co.th/tht/content_data/LT3729_TT_Aerospace_Syncore_Design_Guide.pdf
- [38] Obrázek [online]. [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.virtualacquisitionshowcase.com/thumbnail/2135/large>
- [39] HAUTE INNOVATION. *Foldcore Faltstruktur für Verbundwerkstoffe und Composites* [online]. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.haute-innovation.com/de/magazin/leichtbau/foldcore-faltstruktur-fuer-verbundwerkstoffe-und-composites.html>
- [40] GRIFFITHS, Bob. *High Performance Composites* [online, fotografie]. Compositeworlds.com, 2013 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://d2hcx0y942a51n.cloudfront.net/Digital_Issue/0913HPC_lowres.pdf
- [41] CELPACT: Cellular Structures for Impact Performance. In: *Cellular Structures for Impact Performance - Transport - Research & Innovation - European Commission* [online]. 2012-02-20 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/research/transport/images/projects/a_10_1.jpg

- [42] Obrázek: Rámová trubka kola Festka [online]. [cit 2014-05-23]. Dostupné z: http://rcdn.roadbikereview.com/wp-content/uploads/2012/03/img_0284063.jpg
- [43] Obrázek: Kolo Festka [online]. [cit 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.roadbikeaction.com/contentimages/Zap%20News/2012/Handmade%20Show/HMFestka3.jpg>
- [44] Obrázek: Konstrukce lyže firmy SCOTT [online]. [cit 2014-05-23]. Dostupné z: http://dfp2hfrf3mn0u.cloudfront.net/TEC/TECH_WS_skis_ssc-tit_38367.jpg_mainBanner_1.jpg
- [45] Martinoli srl - Shell wintech racing: Shell construction. MARTINOLI. [online]. [cit. 2014-05-16]. Obrázek ve tvaru JPEG. Dostupné z: <http://www.martinoli.it/img/sezione1.jpg>
- [46] Obrázek: Boeing 787 [online]. [cit 2014-05-23]. Dostupné z: http://www.ahrtp.com/OnlinePubs/AF-447_composites_tail/Boeing_787_composites.throughout.jpg
- [47] DICKINSON, David. Haiku for Mars: Winners Selected for MAVEN Mission. In: *Universe Today: Space and astronomy news* [online]. 20. 8. 2014 [cit. 2014-05-16]. Obrázek ve tvaru JPEG. Dostupné z: <http://www.universetoday.com/104223/haiku-for-mars-winners-selected-for-maven-mission/>
- [48] Obrázek [online]. [cit 2014-05-28]. Dostupné z: http://farm5.static.flickr.com/4015/4300874785_65668741e5.jpg
- [49] BURŠA, Jiří, Přemysl JANÍČEK. *Nelineární úlohy mechaniky v MKP* [online]. Studijní opory. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~jpetruska/nelinearni_mechanika/RNK.zip
- [50] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK a Jan VRBKA. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. 2. vyd. Brno: VUT, 1992, 287 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojní). ISBN 80-214-0468-X.
- [51] FUSEK, Martin a Hamala RADIM. *MKP a MHP* [online]. Ostrava, 31. 8. 2011 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://mi21.vsb.cz/modul/metoda-konecnych-prvku-metoda-hranicnich-prvku>
- [52] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně. Brno, 2008 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=52474
- [53] PODEŠVA, Jiří. *Počítačové modelování nelineárních problémů: Ansys – Workbench: návody do cvičení předmětu „Výpočty v mechanice s použitím MKP“* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 1 DVD-ROM [cit. 2014-05-26]. ISBN 978-80-248-2763-6.
- [54] ŘEZNÍČEK, Jan. *PRUŽNOST A PEVNOST II: KOMENTOVANÉ PŘEDNÁŠKY* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2009. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/~simunale/PP_II_600\(2\).pdf](http://users.fs.cvut.cz/~simunale/PP_II_600(2).pdf)
- [55] PANTĚLEJEV, Libor a Ivo DLOUHÝ. *Elasticita* [online]. Studijní opory předmětu 6MS. VUT v Brně: Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni_stavy/prednasky/03%20-%20Elasticita.ppt
- [56] AKOUR, Salih a Hussein MAAITAH. Finite Element Analysis of Loading Area Effect on Sandwich Panel Behaviour Beyond the Yield Limit. *Finite Element Analysis - New Trends and Developments* [online]. InTech, 2012-10-10

- [cit. 2014-05-29]. DOI: 10.5772/50433. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/howtoreference/finite-element-analysis-new-trends-and-developments/finite-element-analysis-of-loading-area-effect-on-sandwich-panel-behaviour-beyond-the-yield-limit>[57] IVÁÑEZ, Inés, Carlos SANTIUSTE a Sonia SANCHEZ-SAEZ. FEM analysis of dynamic flexural behaviour of composite sandwich beams with foam core. *Composite Structures* [online]. 2010, vol. 92, issue 9, s. 2285-2291 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822309002530>
- [58] VENUGOPAL, M. M., S. K. MAHARANA a K. S. BADARINARAYAN. *Finite Element Evaluation of Composite Sandwich Panel Under Static Four Point Bending Load* [online]. Bangalore: MVJ College of Engineering, 2013 [cit. 2014-05-29]. JEST-M: Vol. 2, Issue 1. Dostupné z: http://www.mvjce.edu.in/jest-m/JEST_V2I1_Paper_1.pdf
- [59] COLLIER RESEARCH. *FEM: NASTRAN Imported and Exported Data Including PCOMP Laminates* [online]. Hampton (VA), © 2011 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://hypersizer.com/download.php?type=pdf&file=2502_HyperSizer-FEM-NASTRAN_Imported_and_Exported_Data_Including_PCOMP_Laminates.pdf
- [60] Patran. MSC SOFTWARE CORPORATION. *MSC Software Corporation: Simulating Reality, Delivering Certainty* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.mssoftware.com/product/patran>
- [61] Obrázek [online]. [cit 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.ecs.csun.edu/hpv/csun2010dp_materialstest.html
- [62] MALÍŠ, Michal. *Protokol o zkoušce č.: P3/2012: Únosnost sendvičového nosníku v ohybu*. Zkušebna letecké techniky, Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství. Brno, 09. 11. 2012.
- [63] *LU01-2007-OST.ST: 6 Pěny a voštiny*. LETECKÝ ÚSTAV, Fakulta strojního inženýrství. Brno, 24s, rev. 1, 10.1.2007.
- [64] *AIREX® C70 Data sheet*. AIREX AG. 07. 2011. Dostupné z: <http://www.3accorematerials.com/products/airex/airexreg-c70.html>
- [65] DASSAULT SYSTEMES. Kritérium napětí Mohr-Coulomb. In: *2011 Náповěda Solidworks* [online]. [2011] [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Checking_stresses/prot_mohr.html?id=6c7a51786dc049f3bc00299d1507c1e3
- [66] DASSAULT SYSTEMES. Plastický mode Drucker – Prager . In: *2011 Náповěda Solidworks* [online]. [2011] [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://help.solidworks.com/2010/czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Materials/Material_models/Drucker - Prager Plasticity Model.htm
- [67] MSC.SOFTWARE CORPORATION. *MSC Nastran 2012: Quick Reference Guide* [online]. November 15, 2011, 3500 s. [cit. 2014-05-29]. NA:V2012:Z:Z:DC-QRG. Dostupné z: http://simcompanion.mssoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC10004&cat=MSC_NASTRAN_DOCUMENTATION_2012&actp=LIST

8 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list materiálu Airex C70.55
Příloha 2 Materiálový list materiálu Herex C70.55

Typical properties for AIREX® C70		Unit (metrical)	Value ¹⁾	C70.40	C70.48	C70.55	C70.75	C70.90	C70.130	C70.200	C70.250
Density	ISO 845	kg/m ³	Average <i>Typ. range</i>	40	48 43 - 55	60 54 - 69	80 72 - 92	100 90 - 115	130 120 - 150	200 180 - 250	250 225 - 288
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	0.45	0.60 0.50	0.90 0.75	1.45 1.10	2.0 1.7	3.0 2.6	5.2 4.5	6.6 5.3
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	41	48 35	69 55	104 80	130 110	170 145	280 240	350 280
Tensile strength in the plane	ISO 527 1-2	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	0.70	0.95 0.8	1.3 1.0	2.0 1.6	2.7 2.2	4.0 3.0	6.0 4.8	7.5 5.5
Tensile modulus in the plane	ISO 527 1-2	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	28	35 28	45 35	66 50	84 65	115 95	175 140	230 160
Shear strength	ISO 1922	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	0.45	0.55 0.50	0.85 0.70	1.2 1.0	1.7 1.4	2.4 2.1	3.5 3.2	4.7 3.8
Shear modulus	ASTM C393	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	13	16 14	22 18	30 24	40 34	54 45	75 68	95 78
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average <i>Minimum</i>	8	10 8	16 10	18 10	23 12	30 20	30 20	30 20
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.031	0.031	0.031	0.033	0.035	0.039	0.048	0.056
Standard sheet	Width	mm ± 5		1330	1270	1150	1020	950	850	750	700
	Length	mm ± 5		2850 ²⁾	2730 ²⁾	2450 ²⁾	2180	2050	1900	1600	1500
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 80	5 to 70	5 to 70	3 to 68	3 to 60	5 to 50	5 to 40	5 to 40
Color				ligh green	violet	yellow	green	red	blue	brown	green

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm except tensile properties (10 mm) and compressive modulus (40 mm)

²⁾ Half size plane sheets for thickness ≤ 8 mm

The data provided gives approximate values for the nominal density and DNV minimum values according to DNV type approval certificate. The information contained herein is believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information. No statement is intended or should be construed as a recommendation to infringe any existing patent.

6 Pěny a voštiny

Tabulka 18 Mechanické hodnoty pěn používaných jako jádrové materiály

Herex	ρ (kg/m ³)	σ_d (MPa)	E_d (MPa)	σ_t (MPa)	E_t (MPa)	τ_d (MPa)	G (MPa)	γ (%)	barva
Herex C70.40	40	0.45	34	0.7	28	0.45	13	10	světle modrá
Herex C70.55	60	0.85	58	1.3	45	0.8	22	20	žlutá
Herex C70.75	80	1.3	83	2.0	63	1.2	30	30	zelená
Herex C70.90	100	1.9	110	2.7	81	1.6	38	33	červená
Herex C70.130	130	2.6	155	3.8	115	2.3	50	35	tmavěmodrá
Herex C70.200	200	4.8	260	6.2	180	3.5	75	35	hnědá
Airex									
Airex R 63.50	60	0.38	30	0.9	30	0.5	11	70	
Airex R 63.80	90	0.9	56	1.4	50	1	21	75	
Airex R 63.110	140	1.6	135	2.4	90	1.85	37	80	

 $\mu = 0,318$

Tabulka 19 Mechanické hodnoty pěn používaných jako jádrové materiály

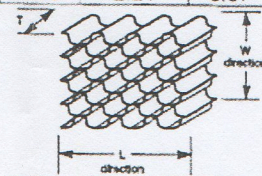
Rohacell IG	ρ (kg/m ³)	σ_d (MPa)	E (MPa)	σ_t (MPa)	τ_d (MPa)	G (MPa)	ϵ (%)	σ_{ohyb} (MPa)
RHC 31 IG	32	0.4	36	1	0.4	13	3.5	0.8
RHC 51 IG	52	0.9	70	1.9	0.8	19	4	1.6
RHC 71 IG	75	1.5	92	2.8	1.3	29	4.5	2.5
RHC 110 IG	110	3	160	3.5	2.4	50	4.5	4.5

Tabulka 20 Mechanické vlastnosti voštin Hexel

Hexcel	Kolmý tlak				V rovině střednice					
	holé		přilepené		L směr (podélný) RD			W směr (příčný)		
	Pevnost [MPa]		Pevnost [MPa]		Pevnost [MPa]		Tuhost [GPa]	Pevnost [MPa]		Tuhost [GPa]
	typická	minimální	typická	minimální	typická	minimální	typická	typická	minimální	typická
Tkanina ze sklených vláken sycená fenolickou pryskyřicí.										
HRP/F35-2.5	0.83	0.62	0.97	0.72	0.59	0.50	0.07	0.31	0.28	0.02
HRP/F35-3.5	2.21	1.69	2.76	2.07	1.38	0.97	0.10	0.72	0.52	0.07
HRP/F35-4.5	3.03	2.34	4.14	3.24	1.93	1.52	0.15	0.97	0.76	0.08
HRP/F50-3.5	2.17	1.55	2.72	1.76	1.17	0.90	0.11	0.62	0.45	0.06
HRP/F50-4.5	2.90	2.34	4.14	3.45	1.83	1.38	0.17	0.97	0.69	0.09
HRP/F50-5.5	4.83	3.72	5.52	4.69	3.03	2.28	0.28	1.62	1.24	0.12
NOMEX - papír vyztužený aramidem a sycený fenolickou pryskyřicí.										
HRH-10/F35-2.5	1.38	1.03	1.60	1.21	0.76	0.62	0.03	0.45	0.34	0.02
HRH-10/F35-3.5	2.83	2.21	2.97	2.28	1.52	1.17	0.04	0.83	0.62	0.03
HRH-10/F35-4.5	4.00	3.03	4.28	3.31	2.07	1.59	0.06	1.31	1.03	0.03
HRH-10/F50-3.5	2.62	2.07	2.76	2.14	1.21	0.90	0.04	0.69	0.52	0.02
HRH-10/F50-4.5	3.90	3.10	4.03	3.24	2.28	1.72	0.07	1.21	0.97	0.03
HRH-10/F50-5.0	3.24	3.59	4.76	3.72	2.62	2.07	0.07	1.48	1.17	0.04
HRH-10/F50-5.5	5.52	4.28	5.86	4.55	2.76	2.21	0.07	1.59	1.24	0.04

Označení: xxxx - vvv - refer. hustota [lb/ft³]

F35/F50 - referenční velikost jádra ve W (příčném) směru



Lb/ft³ ; kg/m³

2,5 ; 40,0

3,5 ; 56,0

4,5 ; 72,0

5,0 ; 80,1

5,5 ; 88,1

číslo zprávy: LU01-2007-OST.ST

10.1.2007
revize č.: 1stran: 24
strana: 12