

Modelování mechanického chování sendvičových struktur

Michaela Kopková

Bakalářská práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Michaela Kopková
Osobní číslo:	T18188
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Modelování mechanického chování sendvičových struktur

Zásady pro vypracování

- Literární přehled
- Návrh numerických modelů
- Řešení modelů
- Vyhodnocení výsledků

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BOWER, Allan F. *Applied mechanics of solids*. Boca Raton: CRC Press, 2010, xxv, 794 s. ISBN 978-1-4398-0247-2.
EHRENSTEIN, G.W. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia Praha, 2009.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne: 21.5.2021

Jméno a příjmení studenta: Michaela Kopková

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá modelováním mechanického chování sendvičových struktur. Teoretická část se zaměřuje na rozdělení a složení sendvičových kompozitních materiálů. Jsou zde také popsány zásady FEM analýzy. V praktické části byly zkoumány možnosti modelování mechanických vlastností dílů z kompozitního sendvičového materiálu pomocí FEM analýzy. Výsledky analýzy byly zpracovány do podoby obrázků a tabulek.

Klíčová slova: sendvičový kompozit, voštinové jádro, FEM analýza

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on modeling of mechanics of sandwich structures. Theoretical part describes classification and composition of sandwich structures. The principles of FEM analysis are described in this part. In the practical part, the possibilities of modeling mechanical behavior of parts made of composite sandwich material using FEM analysis were investigated. The results were included in pictures and charts.

Keywords: sandwich – structured composite, honeycomb core, FEM analysis

Zde bych ráda poděkovala panu doc. Ing. Jakobovi Javoříkovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, ochotu a vždy milý přístup, který projevila jako vedoucí mé bakalářské práce. Velké poděkování patří mé rodině, která po celou dobu mých studií vždy stála po mém boku. Poděkování patří i mému snoubenci Dominikovi za velkou psychickou podporu.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 HISTORIE SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ	11
2 SENDVIČOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
2.1 MATERIÁLY VNĚJŠÍCH POTAHŮ	12
2.1.1 Kovové vnější potahy.....	13
2.1.2 Nekovové vnější potahy	13
2.2 MATERIÁLY JÁDRA	19
2.2.1 Voštinová jádra	19
2.2.2 Pěnová jádra	22
3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	25
3.1 RUČNÍ LAMINOVÁNÍ	25
3.2 PREPREG TECHNOLOGIE	26
3.3 RTM METODA	27
3.4 VAKUOVÁ INFUZE	28
3.5 PULTRUZE	29
4 FEM ANALÝZA	30
4.1 UZLY, PRVKY A SÍTĚ	31
4.1.1 Síť konečných prvků pro 2D a 3D komponenty	31
4.1.2 Uzly	31
4.1.3 Prvky	31
4.1.4 Speciální prvky – nosníky, desky, skořepiny a vazníky	32
5 MECHANIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	34
5.1 HOOKEŮV ZÁKON PRO ORTOTROPNÍ MATERIÁL	34
5.2 MATERIÁLOVÉ KONSTANTY ORTOTROPNÍHO MATERIÁLU	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	38
7 METODIKA	39
7.1 MODEL 1	39
7.2 MODEL 2	46
7.3 MODEL 3	48
8 VÝSLEDKY ANALÝZY	51
8.1 MODEL 2	51
8.2 MODEL 3	55
9 DISKUZE VÝSLEDKŮ	58

ZÁVĚR	60
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	65
SEZNAM OBRÁZKŮ	66
SEZNAM TABULEK.....	68
SEZNAM PŘÍLOH.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

ÚVOD

Sendvičové materiály spadají do velké skupiny materiálů zvaných kompozity. Tyto materiály se vyznačují charakteristickou stavbou, kdy se na povrchu nacházejí dvě tenké vnější vrstvy a uvnitř tlustší vrstva jádra. Kompozitní materiál ve svém složení kombinuje více materiálů s rozdílnými vlastnostmi. Tato kombinace umožňuje dosažení zcela nových vlastností, kterých by jednotlivé materiály nebyly schopny dosáhnout.

Velkou výhodou kompozitních materiálů je jejich nízká hmotnost i při větších objemech. Tato vlastnost velmi usnadňuje montáž a manipulaci s kompozitními díly. Kompozitní materiály mají velmi široké uplatnění. Sendvičové materiály lze nalézt v aplikacích od kosmického, leteckého a automobilového průmyslu přes využití v medicíně až po sportovní potřeby.

V dnešní době je pro návrh kompozitních součástí používána FEM metoda. Při použití této metody musí být vytvořen FEM model, jehož vlastnosti co nejvíce odpovídají vlastnostem skutečného modelu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

Základním principem přírody je efektivní využití hmoty a energie za současného zachování minimální hmotnosti. Je tedy běžnou praxí, že příroda využívá součinnosti různých materiálů za účelem dosažení lepších vlastností. Nejstarší koncept sendvičových struktur bylo tedy možno nalézt v přírodě miliony let před tím, než lidstvo vytvořilo první konstrukce, stavby a stroje. Kostry organismů, listy rostlin nebo křídla ptáků jsou jedny z mnoha příkladů kompozitních struktur, které lze v přírodě nalézt. Včelí plástve sloužily jako inspirace pro řemeslníky již ve starověkém Řecku. Tendence kombinovat různé druhy materiálů za účelem vytvoření produktů o lepších vlastnostech započaly již v období starověku a trvají dodnes. Již v rané historii lidstva byla používána sláma jako vyztužující prvek do hliněných cihel. [1,2,3]

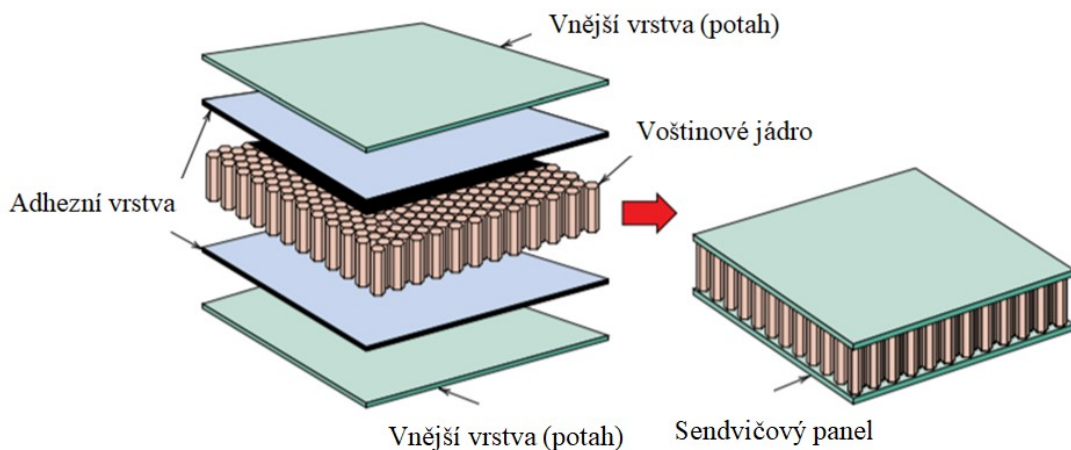
První patent na výrobu voštinového jádra z kartonu byl pravděpodobně vydán v roce 1905 v Německu. Důležitý mezník ve vývoji kompozitních materiálů představovalo patentování výroby fenolických pryskyřic v roce 1907. První sendvičový panel, využitý v leteckém průmyslu, byl vyroben v roce 1919. Konstrukce se skládala z tenkých mahagonových potahů a jádra tvořeného balzou. Byl využit jako hlavní struktura pontonů hydroplánů. V roce 1945 byl zkonstruován první celohliníkový sendvičový panel. Hliníková voštinová jádra musela být perforovaná z důvodu unikání těkavých složek v průběhu vytvrzování lepidla. Lepidla nebyla kvalitní, nedržela na povrchu voštinového jádra a stékala dolů po stěnách. Zlom ve vývoji představoval objev modernějších adheziv, která při vytvrzování neprodukovala těkavé složky. Nebylo tak třeba vyrábět perforovaná voštinová jádra a bylo dosaženo kvalitnějšího spoje mezi potahem a jádrem. V současné době se perforovaných voštin využívá pro vesmírné aplikace, kde není žádoucí přítomnost vzduchu v buňkách voštin. [1,2,4]

Velkým milníkem pro vývoj současných kompozitních materiálů bylo zahájení průmyslové výroby skleněných vláken v roce 1935 a následně v roce 1938 vydání patentu na výrobu epoxidových pryskyřic. Zahájení výroby uhlíkových vláken v roce 1959 je považováno za zlomový okamžik, který hluboce ovlivnil dnešní a budoucí technologie. V dnešní době podléhají sendvičové materiály a konstrukce neustálému vývoji. [1,2]

2 SENDVIČOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Sendvičový kompozit je speciální případ laminárního kompozitu. Sendvičová konstrukce se skládá z kombinací různých materiálů. Tyto materiály jsou k sobě připevněny. Cílem je maximálně využít vlastnosti každého separátního materiálu ve prospěch celku. [5]

Sendvičová konstrukce se skládá ze tří hlavních částí. Dvě složky tvoří tenké, tuhé a pevné krycí vnější vrstvy neboli potahy. Tyto části jsou obvykle identické z pohledu použitého materiálu i tloušťky. Mezi těmito vrstvami se nachází jádro, které je k vnějším vrstvám připevněno. Jádro bývá vyrobeno z lehkého materiálu o nízkém modulu pružnosti. Jádro tvoří spojitou podporu vnějších vrstev a drží je pohromadě. [5,6]



Obrázek 1: Schéma sendvičového panelu s voštinovým jádrem [6]

2.1 Materiály vnějších potahů

Téměř každý materiál, který je schopen vytvořit tenké vrstvy, může být použit pro tvorbu vnějších sendvičových vrstev. Hlavním cílem konstrukcí sendvičových materiálů je efektivní využití vlastností každého prvku konstrukce. Požadované vlastnosti pro potahy jsou:

- vysoká ohybová tuhost
- vysoká tahová a tlaková pevnost
- odolnost vůči nárazu
- kvalita povrchu
- odolnost vůči vlivům prostředí

- otěru odolnost [1,7]

Běžně používané materiály krycích potahů se rozdělují do dvou základních skupin: kovové a nekovové materiály. [7]

2.1.1 Kovové vnější potahy

Kovové krycí potahy mohou být vyráběny z oceli, nerezavějící oceli, hliníkových a titanových slitin. Výhody ve využívání kovových krycích potahů spočívají ve vysoké tuhosti, nízké ceně, dobré kvalitě povrchu a dobré odolnosti vůči nárazu. Mezi nedostatky těchto materiálů se řadí vysoká hustota a složitost výroby sendvičových konstrukcí. [7]

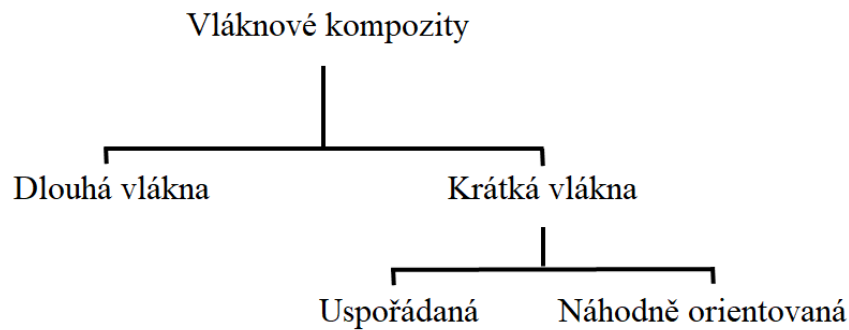
2.1.2 Nekovové vnější potahy

Nekovové vnější potahy představují širší skupinu materiálů než dříve zmíněné kovové vnější potahy. Do nekovových krycích potahů řadíme materiály jako překližka, cement, dýha, vyztužené plasty a vláknové kompozity. [7]

2.1.2.1 Vláknové kompozity - výztuže

Tento typ materiálu se řadí mezi nejpoužívanější nekovový materiál vnějších krycích potahů v sendvičových konstrukcích. Vláknové kompozity se skládají z vláken, která se vyznačují vysokou měrnou pevností, a matrice, která je vyrobena z přizpůsobivého materiálu. [1,7]

Skleněná vlákna představují nejpoužívanější typ výztuže kompozitních materiálů. Jejich velkou výhodou je nízká cena, malá hmotnosti a velká pevnost. Nejrozšířenější druh skleněných vláken se označuje jako E-sklovina (elektrická). Dalším velmi používaným typem skleněných vláken je S-sklovina. R-sklovina představuje další typ vláken. Tento druh skleněných vláken má v porovnání s S-sklovinou vyšší pevnost o 40 – 70%, a také vyšší odolnost vůči kyselinám. C-sklovina se vyznačuje odolností proti kyselinám a chemicky agresivním látkám. [1,2]



Obrázek 2: Základní rozdělení vláknových kompozitů [6]

Aramidová vlákna jsou tvořena lineárními organickými polymery. Velkou výhodou těchto vláken představuje vysoká tuhost a pevnost, která je dána přítomností aromatických jader v řetězci molekuly. Vyznačují se vysokou pevností v tahu, které zatím nebylo dosaženo jinými komerčně dostupnými vlákny. Mezi nevýhody aramidových vláken se řadí jejich silně anizotropní vlastnosti, to znamená, že naměřené hodnoty pevnosti a Youngova modulu pružnosti se liší v různých směrech. Mez pevnosti v tlaku je u aramidových vláken podstatně nižší než mez pevnosti v tahu. Aramidové kompozity jsou velmi vhodné pro tahová namáhání, ale nehodí se pro konstrukce, které jsou namáhány ohybem nebo tlakem. Aramidová vlákna mají hydrofilní vlastnosti, díky kterým absorbují vlhkost z okolí a ta pak dále ovlivňuje pevnost spoje mezi vláknem a matricí. Aramidové kompozity netají při vysokých teplotách, odolávají teplotám až 300 °C. V praxi jsou využívána pro protipožární ochranné obleky. [1,8]

Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou hodnotou pevnosti a tuhosti. Tato vlákna jsou tvořena z více než 90% uhlíkem. Pokud jsou vlákna vhodně zvolena a umístěna, mohou být součástí z kompozitů vyztužených těmito vlákny pevnější a tužší než ty samé součásti z oceli při méně než poloviční hmotnosti. Uhlíková vlákna jsou silně anizotropním materiálem, nejen pokud se jedná o pevnost a tuhost materiálu, ale i v případě teplotní roztažnosti a teplotní vodivosti. Při zpracování se mohou velmi lehce polámat, proto je nutná povrchová úprava, která způsobuje při delším skladování ztrátu ohebnosti vláken. Tato vlákna jsou velmi odolná vůči dlouhodobému dynamickému namáhání. Jsou také velmi odolná vůči korozi. V praxi se využívají i jako implantáty (např. umělé klouby) díky jejich dobré snášenlivosti s tělními tkáněmi. [1,2,8,9]

Přírodní vlákna se také používají pro výztuhy krycích potahů. Pro tento případ použití jsou vhodná vlákna obsahující celulózu, musí se tedy jednat o rostlinná vlákna. Do této skupiny vláken patří například len, sisal, konopí, juta, bavlna a další. Ze všech těchto druhů přírodních vláken jsou z hlediska celosvětové produkce nejrozšířenější juta a len. Mezi výhody těchto vláken se řadí nízká hustota, nízká abrazivita při mechanickém opracování a snadná likvidace spalováním. Tato vlákna jsou citlivá na působení vlhkosti a jejich vlastnosti závisí na růstových podmínkách. K tomuto materiálu je třeba vhodně zvolit matrici, aby nedocházelo k rozkladu vláken. [1]

2.1.2.2 Vláknové kompozity – matrice

Hlavní úlohou matrice je držet vlákna v uspořádaném souboru a chránit je před vnějšími vlivy. Matrice je klíčová v přenosu namáhání na vlákna vnějších potahů, čímž je povrchu vyztužujících vláken chráněn před poškozením. Matrice dodává kompozitnímu materiálu tvrdost, odolnost proti poškození a otěru. Pro vytvoření kvalitního kompozitu je důležité, aby matrice dobře přilnula na vyztužující vlákno. V závislosti na druhu používané matrice se na vlákna nanáší apretace, aby bylo dosaženo lepší vazby matrice – vlákno. Je nutno volit správnou viskozitu matrice, aby došlo k úplnému smáčení vlákna a v matrici se neobjevily bubliny. Matrice vláknových kompozitů může být kovová, polymerní nebo keramická. [1,6,8]

U polymerních kompozitů rozlišujeme dva základní druhy matrice, termosetové (reaktoplastické) a termoplastické. [10]

Termoplastické pryskyřice lze opakovaně převádět do tekutého stavu za působení vyšších teplot. Výhodou termoplastických matric je jejich houževnatost. Nevýhodou těchto matric oproti termosetovým je jejich menší tepelná odolnost a menší odolnost vůči chemickým vlivům. Během zpracování termoplastů nedochází k chemické reakci, která by ovlivnila jakost výsledného výrobku. U termoplastických materiálů dochází kvůli vyšší viskozitě pryskyřice k horšímu prosycování vyztužujících vláken. Do skupiny termoplastů používaných pro matrice patří například polypropylen, polyamid, polyester a polykarbonát. [1,10]

Reaktoplastické pryskyřice jsou nejčastěji používaným typem matrice při výrobě kompozitů. Jedná se o produkty chemické reakce – vytvrzování. K vytvrzení dochází buďto samostatně nebo za pomoci tvrdidla nebo katalyzátorů. Tato chemická reakce je nevratná a jejím výsledkem je tvrdý a netavitelný produkt. Nejpoužívanější typy reaktoplastických pryskyřic jsou:

- Nenasycené polyesterové pryskyřice
- Vinylesterové nebo fenakrylátové pryskyřice
- Epoxidové pryskyřice
- Fenolické pryskyřice
- Metakrylátové pryskyřice
- Izokyanátové pryskyřice [1,10]

Polyesterové pryskyřice patří mezi hojně využívané druhy matrice pro kompozitní materiály. Většina polyesterových pryskyřic je lepkavý, světlý roztok. Při vytvrzování těchto pryskyřic za normálních nebo zvýšených teplot nedochází k uvolňování těkavých složek. V průběhu vytvrzování dochází k uvolnění reakčního tepla. Mezi výhody nenasycených polyesterových pryskyřic se řadí zejména jejich příznivá cena, jejich velká variabilita při zpracování a jejich odolnost vůči povětrnostním vlivům. Při zpracování těchto pryskyřic dochází k velkému smrštění, které se pohybuje v rozmezí 6 až 9 %. Díky svému obsahu styrenu ve složení se neřadí mezi ekologické varianty. [1,8,10]

Vinylesterové pryskyřice jsou z hlediska chemického složení podobné polyesterovým pryskyřicím. Kompozity s matricí z vinylesterové pryskyřice se vyznačují vysokou houževnatostí a na rozdíl od nenasycených polyesterových pryskyřic odolávají alkalickému prostředí. Lze je použít pro aplikace v korozním prostředí. [1,10]

Epoxidové pryskyřice jsou nejběžnějším materiálem pro matrici vysokopevnostních kompozitů. Ve své molekule obsahují nejméně jednu epoxidovou skupinu. Epoxidové pryskyřice se vyznačují velice dobrými mechanickými vlastnostmi a dobrou adhezí k mnoha druhům podkladů. Rozměrová stálost těchto pryskyřic je velmi vysoká. Jejich cena může být až čtyřikrát vyšší než při použití nenasycených polyesterových pryskyřic. Epoxidové pryskyřice mají vysokou viskozitu a vytvrzovací reakce probíhá pomalu, jejich zpracování je proto obtížnější. Při zpracování těchto pryskyřic je nutná ochrana, protože dráždí kůži a mohou způsobovat alergie. [1,8]

Fenolické pryskyřice jsou za běžných podmínek velmi křehké a vykazují vysoké hodnoty smrštění během procesu vytvrzování. Jejich hlavní využití spočívá v interiérových aplikacích pro letecký průmysl, zejména díky nízké hořlavosti a malé produkci kouře během hoření. Jsou velmi odolné vůči vysokým teplotám a jsou využívány jako žáruvzdorné panely. [8]

2.1.2.3 Prepregy

Prepregy jsou speciálním případem materiálu využívaného na krycí potahy. Jedná se o materiál, který je složen ze souvislých vyztužujících vláken, která byla impregnována přesně daným množstvím polymerní matrice. Jednotlivá vlákna od sebe nemohou být rozeznána z důvodu pokrytí vláken pryskyřicí. Při procesu impregnace vláken pryskyřicí je přísně kontrolován poměr pryskyřice a vláken, a je dbáno na vhodnou tloušťku vytvořené vrstvy. Pro výrobu prepregů může být použita reaktoplastická (termosetická) i termoplastická matrice. Prepregy mohou být snadno tvarovatelné do požadovaných tvarů. [11,12]

Termosetové prepregy jsou vyráběny nasycením vláknové výztuže kapalnou termosetovou pryskyřicí. Přebytek pryskyřice je poté z výztuže odstraněn a pryskyřice projde částečným vytvrzováním. V této fázi se kapalina mění v pevné skupenství, které si zachovává poddajnost. Tento stav prepregu bývá označován také jako B - fáze. Prepregy v této fázi je nutno skladovat v chladu. Proces vytvrzení je dovršen působením tepla. [12]

Termoplastické prepregy jsou vyráběny potahováním výztuže vláken termoplastickou matricí. Výhoda termoplastických prepregů spočívá ve schopnosti jejich opakovaného ohřevu a opakovanému formování materiálů v případě, že dojde k zahřátí nad teplotu tání použité termoplastické matrice. Termoplastické prepregy mohou být skladovány při pokojové teplotě, jelikož prepreg se při těchto teplotách vyskytuje v pevné fázi. [12]

Prepregy bývají využívány v konstrukcích, kde požadavky na hmotnost a mechanické vlastnosti jsou upřednostňovány před náklady. Při výrobě prepregů je běžně používána epoxidová pryskyřice a uhlíková vlákna, aramidová vlákna nebo jiná pokročilá vlákna. [12]

..

Mezi výhody prepregů patří:

- Maximální pevnostní vlastnosti: Při využití metody ručního laminování lze obtížně dosáhnout 50% obsahu pryskyřice. I při využití metody vakuové laminace se nelze vyvarovat značného množství přebytečné pryskyřice. Tento přebytek poté zvyšuje křehkost materiálu. Obsah pryskyřice u většiny prepregů se pohybuje kolem 35%. Tohoto procenta není možné dosáhnout při použití technologie ruční laminace.
- Rovnoměrná distribuce pryskyřice: Výhodou prepregů je stejnoměrná tloušťka po celé ploše. Nenacházejí se zde suchá místa nebo naopak místa bohatá na pryskyřici.
- Malý odpad: Při použití prepregů se snižuje produkce odpadu v porovnání s technologií ručního laminování.
- Krátký vytvrzovací cyklus: Po dokončení vytvrzování je díl připraven k okamžitému provozu. Není zde potřeba čekat na úplné vytvrzení jako tomu je u ostatních technologií.
- Vzhled finálního výrobku: Na konečný vzhled součásti má stále vliv příprava formy. Při využití prepregů se eliminuje množství vzduchových bublin. Lze lépe dosáhnout hladkého a lesklého povrchu. [13]

Mezi nevýhody prepregů patří:

- Cena: Prepregy jsou nákladné. Po sečtení nákladů na pryskyřici, vytvrzení a použité textilie, se tato technologie nemůže cenově přiblížit technologii ručního laminování.
- Skladování: Při skladování prepregů je nutno brát ohledy na druh prepregu. Vyšší teploty zkracují trvanlivost. Skladování při nižších teplotách výrazně prodlužuje životnost materiálu.
- Nutnost vytvrzení za použití tepla: Pro vytvrzení je třeba použít tepelný zdroj, který dosáhne hodnoty doporučené teploty pro vytvrzení a bude schopen tuto teplotu udržet po doporučenou dobu. Vytvrzení může probíhat například v autoklávu, ale všeobecně lze použít jakýkoliv zdroj tepla. [13]

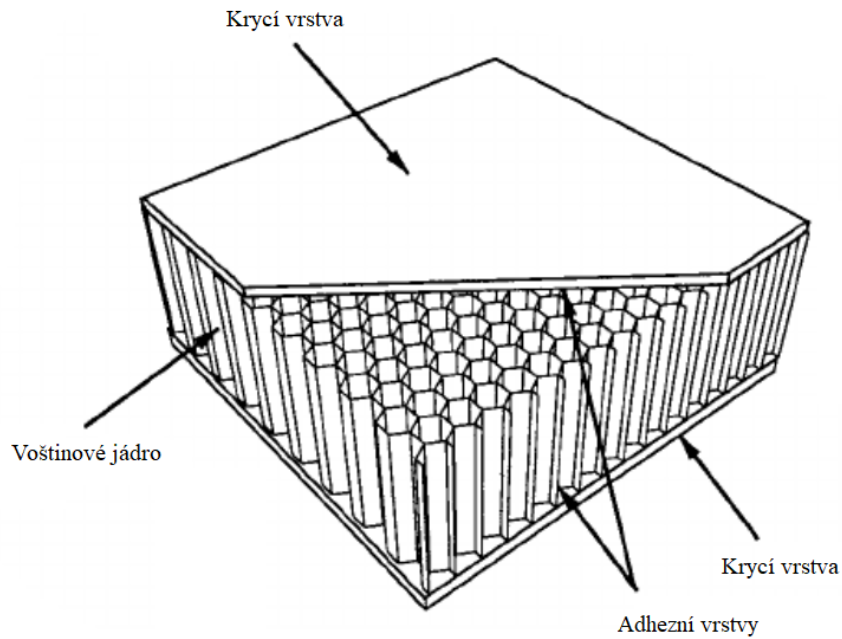
2.2 Materiály jádra

Primární funkce jádra v sendvičové struktuře kompozitu je oddělit, podpořit a stabilizovat desky vnějších potahů. Další funkce jádra mohou být tepelná a akustická izolace, jejíž míra závisí na použitém materiálu. Cílem je dosažení co nejlepších vlastností při současném zachování minimální hmotnosti. Materiál jádra má v porovnání s materiály vnějších potahů nebo adhezní vrstvy menší hustotu. Mezi nejpoužívanější druhy materiálů jader v sendvičových konstrukcích patří:

- voštinová jádra
- pěnová jádra
- jádra z balzového dřeva [14]

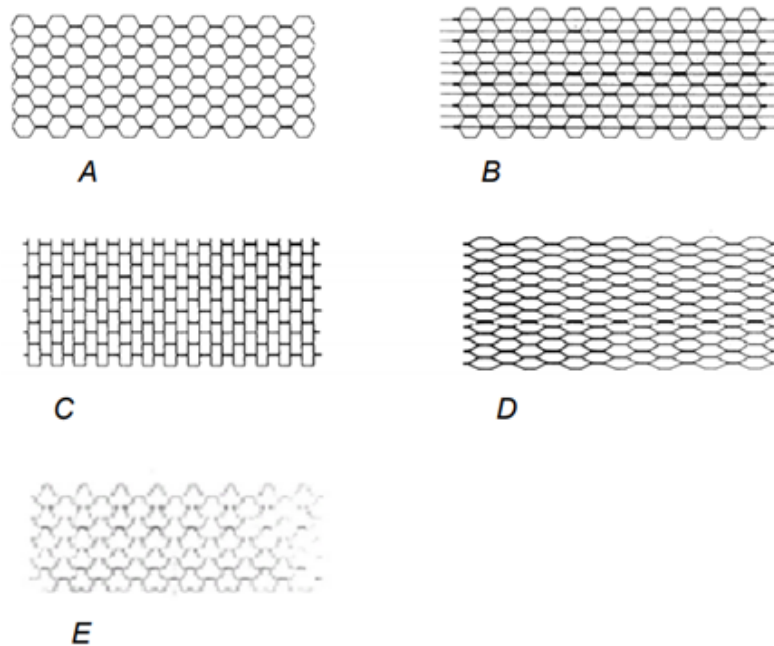
2.2.1 Voštinová jádra

Voštinová jádra jsou nejčastěji vyrobena z hliníku, skelných vláken, aramidového papíru, aramidových vláken nebo uhlíkových vláken. Základní stavební jednotkou voštinových jader je buňka. Jednotlivé buňky voštinových jader mohou nabývat různých tvarů. Mezi nejběžnější typy patří šestihranné buňky. Voštinová jádra s šestihrannými buňkami jsou dodnes nejpoužívanější. Mohou být vyráběna z kovových materiálů, například hliníku, nebo nekovových materiálů. Hlavní nevýhodou voštinových jader vyrobených ze šestihranných buněk je jejich omezená tvarovatelnost. Voštinová jádra se speciálně uzpůsobenými buňkami mohou být tvarována do složitých tvarů. Pro některé druhy jader, obzvláště ta nekovová, může být tvarování usnadněno použitím tepla. [8,14]



Obrázek 3: Kompozit s voštinovým jádrem [15]

Na obrázku níže lze vidět několik typů voštinových jader. Typy A a B jsou využívány pro aplikace s mírným zakřivením, protože nejsou schopny příliš velkého tvarování. Ostatní zobrazené typy voštinových jader mohou být tvarovány do poměrně velkých zakřivení. [8,14]



Obrázek 4: Typy voštinových jader [14]

Voštinová jádra vyrobená z hliníku mohou nabídnout nejvyšší hodnoty poměru pevnosti k hmotnosti. Hliníková fólie nabízí širokou škálu způsobu přilnutí, díky kterému mohou být vyráběny rozmanité geometrické tvary buněk voštinových jader. Mechanické vlastnosti hliníkových voštinových jader mohou být ovlivňovány změnou tloušťky hliníkové fólie a velikosti buňky. Tato voštinová jádra nabízejí velmi dobré mechanické vlastnosti při nízké ceně, přesto jejich využití v některých aplikacích musí být velmi pečlivě zváženo. Příkladem mohou být velké lodní konstrukce, kde hrozí riziko koroze voštinového jádra díky působení slané vody. Tento typ voštinových jader také nevykazuje žádnou tvarovou paměť. Může nastat případ, kdy hliníkové voštinové jádro zůstane nevratně zdeformované a krycí potahy se navrátí zpět do původní polohy. V takovém případě vznikají místa s porušenými spoji mezi jádrem a krycími potahy, což má za následek snížení mechanických vlastností celého kompozitu. [9]

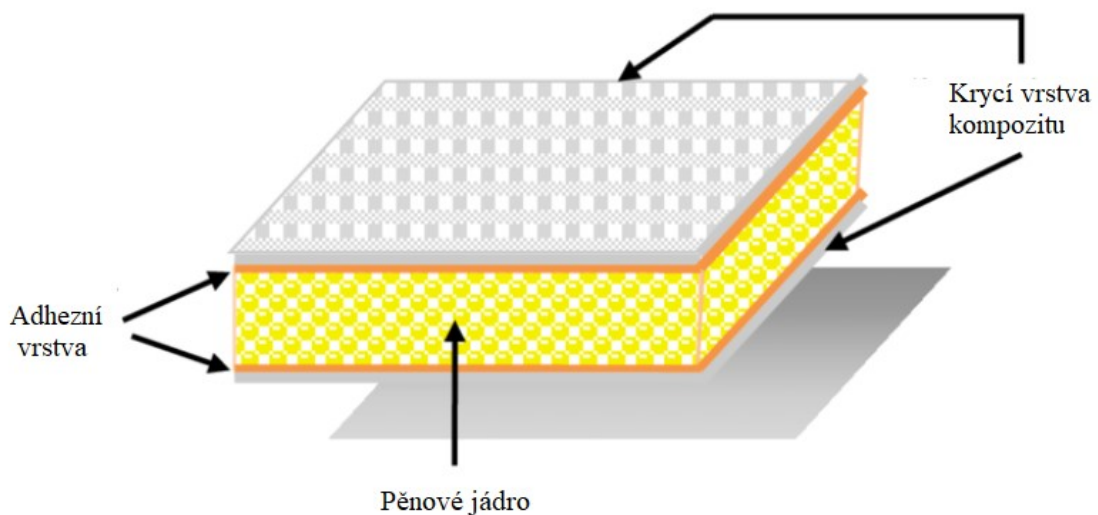
Dalším typem voštinových jader jsou Nomexová voštinová jádra. Základ papíru Nomex představuje Kevlar namísto běžných vláken z celulózy. Tento druh voštiny je obvykle namáčen do fenolické pryskyřice, aby došlo k vytvoření jádra s vyšší pevností a dobrou ohnivzdorností. Jsou široce využívány pro lehčené výplně interiérových dveří například v leteckém průmyslu a v interiérových aplikacích hromadné dopravy. Nomexová voštinová jádra jsou využívána stále častěji díky jejich vysokým mechanickým vlastnostem, nízké hustotě a dlouhodobé stabilitě. Nevýhodou tohoto materiálu je cena. [8,10]

Voštinová jádra vyrobená z termoplastů se vyznačují nízkou hmotností a možností snadné recyklace. Nevýhodou tohoto typu voštinových jader je relativně nízká tuhost a jeho obtížná adheze k povrchu krycích potahů. Velmi výjimečně se využívají ve vysoce namáhaných konstrukcích. Používají se v jednoduchých interiérových panelech. Nejčastějšími polymery pro výrobu tohoto typu jader jsou:

- ABS – zajišťuje tuhost, odolnost proti nárazu, pevnost, povrchovou tvrdost a rozměrovou stabilitu
- Polykarbonát – zajišťuje UV stabilitu, výborný přenos světla, dobrou žáruvzdornost a samozhášivé vlastnosti
- Polypropylen – dodává jádru dobrou chemickou odolnost
- Polyetylen – obecně používaný materiál, nízká cena [10]

2.2.2 Pěnová jádra

Druhým velmi používaným typem jader sendvičových kompozitů jsou pěnová jádra. Přestože mechanické vlastnosti pěnových jader nedosahují úrovně mechanických vlastností voštinových jader, jsou široce využívána v komerčních aplikacích, jako jsou lodní konstrukce a konstrukce lehkých letounů. Polymerní pěna jader má dvoufázové složení, kdy jsou částice plynné složky tvořící buňky rozptýleny v pevné polymerní fázi. Buňky plynu mohou být otevřené a navzájem propojené, nebo uzavřené a nespojitě. Obecně platí, že s vyšším procentem obsahu uzavřených vzduchových buněk roste hustota. Téměř všechny pěny jader pro stavební aplikace obsahují uzavřené buňky plynu, které v jejich objemu převažují. Pěny obsahující otevřené buňky s plynem dobře pohlcují zvuk, jsou slabší a vyznačují se vyšší absorpcí vody než pěny obsahující uzavřené buňky s plynem. [6,8,14]



Obrázek 5: Kompozit s pěnovým jádrem [16]

2.2.2.1 Polyvinylchloridová pěnová jádra

Polyvinylchloridová pěnová jádra patří mezi běžně používané materiály jader pro konstrukce vysokopevnostních kompozitů. PVC pěny nabízejí vyváženou kombinaci statických a dynamických mechanických vlastností. Vyznačují se dobrou odolností vůči absorpci vody a jsou odolné vůči mnohým chemikáliím. Přestože jsou PVC pěny obecně hořlavé, existují druhy zpomalující hoření, které lze využít v mnoha protipožárních aplikacích. [9]

Tento typ pěn se může vyskytovat ve dvou základních formách, nezesíťované (termoplastické) a zesíťované (reaktoplastické). Zesíťovaný typ PVC pěny je všeobecně tužší, odolnější vůči poškození a lépe tvarovatelný za tepla. Zesíťované PVC pěny se vyznačují lepšími mechanickými vlastnostmi, vyšší odolností vůči rozpouštědlům a vyšší tepelnou odolností. Nevýhodou pěn vyráběných ze zesíťovaného PVC je jejich křehkost a obtížnější tvarovatelnost za tepla ve srovnání s nezesíťovanými PVC pěny. [8,10]

2.2.2.2 Polystyrenová pěnová jádra

Polystyrenová pěnová jádra se vyznačují nízkou hmotností, snadno se brousí a jsou levná. Velmi vzácně jsou používána ve stavebních aplikacích z důvodu nízkých mechanických vlastností. Nemohou být použita v kombinaci s polyesterovými pryskyřicemi, protože by došlo k rozpuštění materiálu jádra. Polystyrenové pěny se používají při výrobě plachet a surfových prken. [8,10]

2.2.2.3 Polyuretanová pěnová jádra

Polyuretanové pěny jsou dostupné ve dvou variantách, termoplastické nebo termosetické. Polyuretanové pěny se dodávají buďto jako hotové bloky nebo jednotlivé složky, které lze na místě smíchat a napěnit. Tento typ pěn má průměrné mechanické vlastnosti a spoj na rozhraní pryskyřice a jádra má tendence s věkem slábnout. Polyuretanové pěny mohou být snadno řezány a zpracovávány do různých tvarů. Je nutno vyhnout se řezání pěn horkými dráty, jelikož by mohlo dojít k uvolnění nebezpečných výparů plynu. Polyuretanové pěny mohou být použity při výrobě sendvičových panelů pro malá zatížení, kdy jsou tyto panely využívány široce zejména pro svou tepelnou izolaci a dobrou akustickou izolaci. [8,10]

2.2.2.4 Akrylová pěnová jádra

Tyto pěny jsou lehce zesíťované a obsahují uzavřené buňky plynu. Mají výborné mechanické vlastnosti a dobrou odolnost vůči rozpouštědlům a žáruvzdornost. Mohou být tepelně tvarovány. Tento typ jader nabízí jedny z nejvyšších hodnot celkové pevnosti a tuhosti. Jsou unikátní svou vysokou rozměrovou stabilitou. Akrylové pěny jsou obvykle velmi drahé a jsou obvykle používány pro kosmické a letecké účely. [8,10]

2.2.2.5 Pěny založené na bázi kopolymeru styrenu s akrylonitrilem (SAN pěny)

Tento druh pěn se chová podobně jako zesíťované PVC pěny. Jejich statické mechanické vlastnosti jsou ve většině případů velmi podobné, ale vyznačují se vyšší pevností a vyšší schopností prodloužení. Jsou schopny absorpce takových nárazových účinků, které by poškodily konvenční pěny, dokonce i tvrzené PVC pěny. Pevnost těchto pěn je dána typem použitého polymeru, a tak se na rozdíl od tvrzených PVC pěn s věkem výrazně nemění. SAN pěny nahrazují nezesíťované PVC pěny v mnoha aplikacích díky jejich lepším mechanickým vlastnostem, jako jsou vyšší schopnost prodloužení, vyšší pevnost a vyšší tepelná odolnost. [8,10]

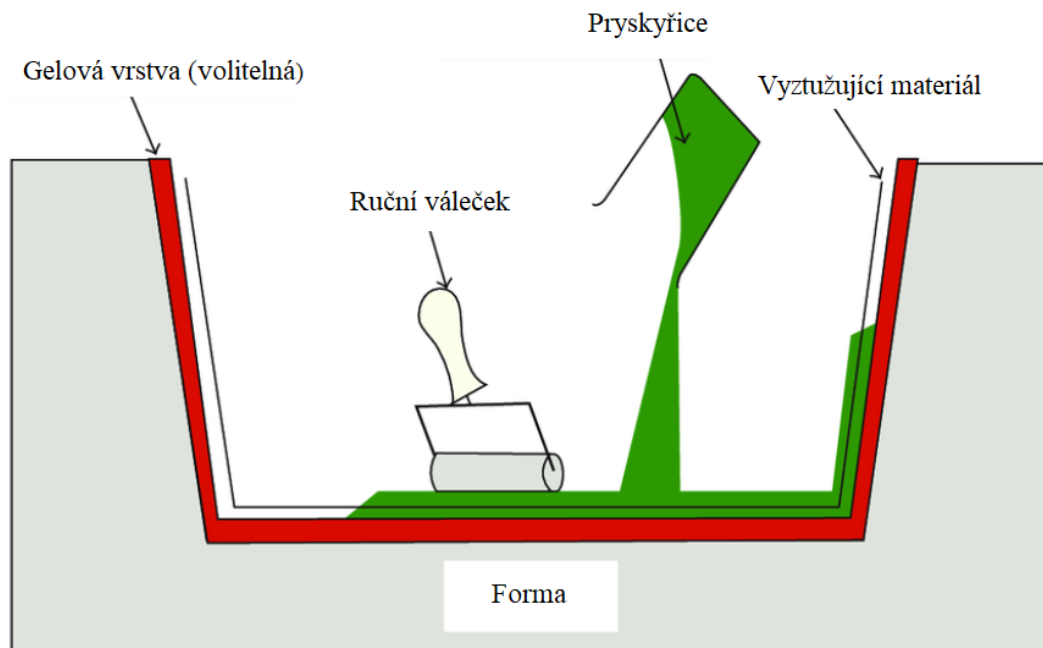
3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

3.1 Ruční laminování

Tato metoda se řadí mezi nejdéle používané metody výroby kompozitních materiálů a dodnes je to velmi používaná metoda pro výrobu široké škály kompozitních produktů. Tato technologie představuje základní proces, který poskytuje mnoho výhod ze zpracování kompozitů při současném využití relativně běžných materiálů a základních technologií. Metoda ručního laminování spočívá v kladení výztuh a nanášení tekuté pryskyřice na povrch otevřené formy, která může být opatřena gelovým separačním nátěrem. Ne vždy musí být podkladem pro nanášení výztuh a pryskyřice forma. Tato technologie může sloužit pro opravy nádrží a potrubí v terénu. [17]

Technologie ručního laminování je proces nejčastěji používaný pro malé a střední série (obvykle od několika do 300 dílů za rok). Tato technologie nabízí řadu výhod. Je možná produkce velkých a komplikovaných tvarů. Taktéž je možné za využití této metody vyrobit menší a jednodušší kompozitní výrobky. Tento proces nevyžaduje vysoké investiční náklady a velkou předchozí znalost pracovního procesu. Dobře školení operátoři výroby jsou schopni výroby komponentů a produktů o velmi vysoké kvalitě. [17]

Vlastnosti výsledného kompozitu závisí na kvalitě použité pryskyřice a typu výztuže. Velkou výhodou technologie ručního laminování je snadné přizpůsobení vlastností výsledného kompozitu. Vlastnosti lze měnit změnou podílu vláken a pryskyřice, změnou orientace použité výztuže. Příliš vysoký podíl vláken může mít za následek nedostatečné prosycení výztuže pryskyřicí. V tomto případě dochází k zhoršení výsledných vlastností. [17]



Obrázek 6: Technologie ručního laminování [18]

3.2 Prepreg technologie

Prepreg se využívá ve dvou základních typech – jednosměrný polotovar a tkanina. Z důvodu výrobních nákladů se používají prepregy z tkané textilie kdekoli je to možné, a to i přesto, že výsledné výrobky vykazují nižší hodnoty tuhosti a pevnosti. Prepregy z tkané textilie obsahují také vyšší množství pryskyřice, což má za následek vyšší hmotnost výsledného produktu než je tomu u jednosměrných vrstev laminátů. Tkané prepregy na rozdíl od jednosměrných prepregů vykazují mnohem vyšší odolnost vůči poškození. [17]

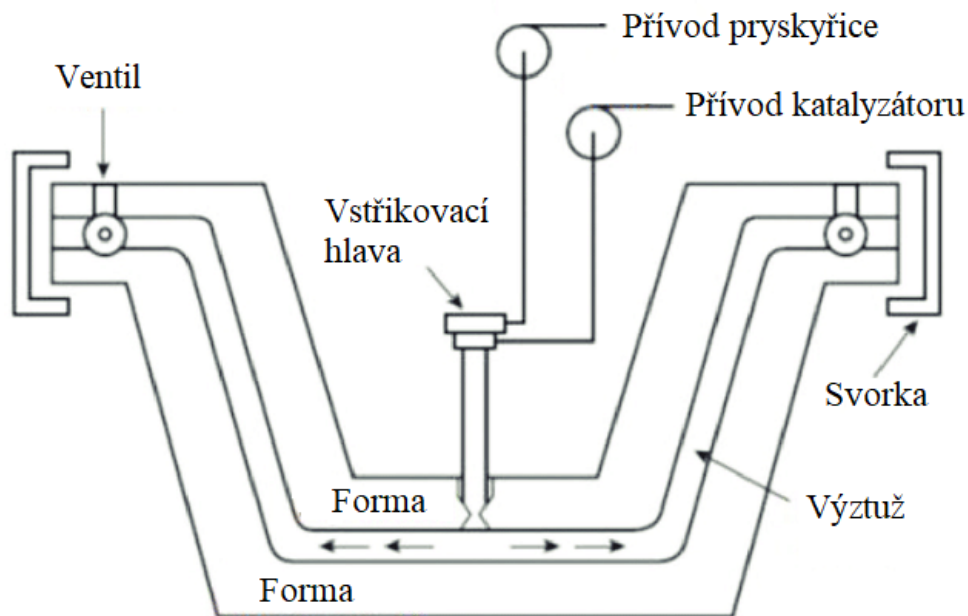
Pryskyřice při výrobě prepregů prochází několika stavy. Nejdříve jsou přísady pro pryskyřice umístěny v mixérech, kde dochází k pomalému ohřevu. Pryskyřice v tomto stavu má velmi nízkou viskozitu, což umožňuje dobrý tok a impregnaci vláken pryskyřicí. Pryskyřice a vytvrzovací prostředky používané ve směsích mohou být velmi reaktivní, proto je nutno bránit případné exotermické reakci, která by mohla způsobit výbuch nebo požár. [8]

Pryskyřice je rozprostřena při požadované tloušťce na podkladový papír. Takto rozvrstvená pryskyřice může být vložena do sáčků a zmrazena pro příští použití. Jakmile je vrstva pryskyřice připravena k impregnaci, je impregnace prováděna na samostatném stroji. Vlákná jsou chráněna na obou stranách podkladovým papírem. Impregnace je dosaženo aplikací tepla a tlaku na dvouválcí, kdy jsou vlákna, pryskyřice a ochranné papíry taženy

přes štěrbinu. Jakmile je materiál protažen druhým dvouválcem, je okamžitě ochlazen, aby byla zvýšena viskozita pryskyřice. Výsledkem je polotuhý prepreg. Na výstupu se horní list papíru odstraní, okraje jsou zarovnány noži a hotový prepreg je navinut na cívku. Tento proces běží rychlostí až 6 m/min. Šířka pásu prepregu může dosáhnout až 1,5 m. Touto technikou je vyráběna většina prepregů. [8]

3.3 RTM metoda

Technologií RTM (z ang. Resin Transfer Molding) je možno vyrábět tvarově složité 3D součásti o malých tolerancích. Takto vyrobené kompozitní materiály disponují vysokými mechanickými vlastnostmi a dobrou kvalitou finálního povrchu. Tato metoda je velmi efektivní z pohledu finančních nákladů. Technologií RTM lze vyrobit miniaturní součástky až po součásti velkých rozměrů. Na jednu stranu formy jsou naklady materiály tvořící budoucí kompozit a pomocné materiály. Forma je poté uzavřena druhou stranou. Před samotným dodáním pryskyřice se může v tomto výrobním procesu objevit fáze, kdy se vytvoří předlisek, kdy je aplikován tlak vyvolaný druhou stranou formy. Vhodná pryskyřice je poté vstřikovávána do formy pod určitým tlakem. Jakmile je forma zcela zaplněna pryskyřicí, je přívod pryskyřice zastaven. V tomto stavu se materiál nechá vytvrdit. Po vytvrzení dochází k otevření formy a vyjmutí výsledného kompozitu. RTM technologie umožňují dosažení požadované tloušťky a požadovaného objemového podílu vláken v kompozitu. Tato technologie má široké využití v automobilovém průmyslu. [8,19]



Obrázek 7: Technologie RTM [20]

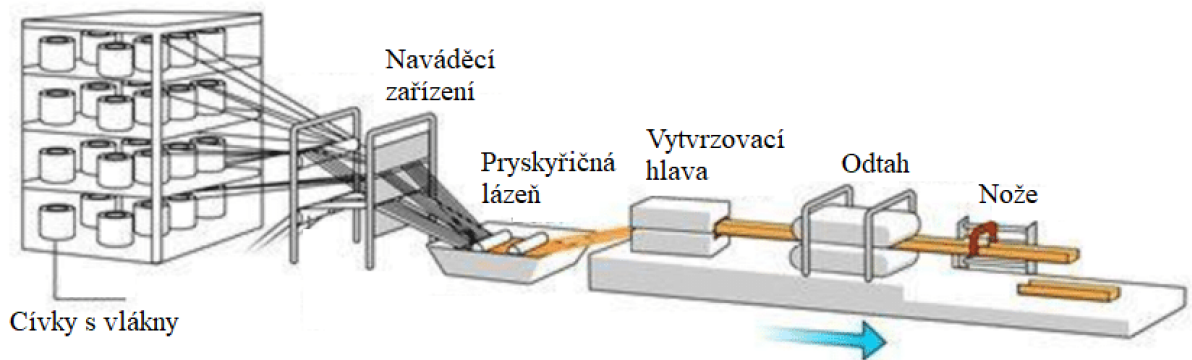
3.4 Vakuová infuze

Technologie vakuové infuze využívá techniky vstřikování pryskyřice a je odvozena od technologie RTM. Suchá výztuž je nejprve umístěna do formy. Poté je forma uzavřena a je otevřen přívod pryskyřice. Vakuová infuze se od technologie RTM liší dle tlakového gradientu, který je aplikován a nutí pryskyřici protékat formou. V případě vakuové infuze je tlakový gradient vytvořen vakuem. Nádoba s pryskyřicí a přívodní otvor jsou vystaveny tlaku okolí, na rozdíl od technologie RTM, kde je v nádobě s pryskyřicí větší tlak. Pryskyřice protéká formou a impregnuje výztuž. Následně proběhne vytvrzení pryskyřice, forma se otevře a výsledný produkt se vyjme z formy. [17]

Použití vakua jako hnacího mechanismu toku pryskyřice má řadu výhod. Při metodě vakuové infuze nepůsobí velké síly na formu, na rozdíl od technologie RTM. Díky tomu nemá tato technologie tak velké nároky na tuhost nástrojů. Mezi nevýhody této technologie se řadí velká citlivost na netěsnosti, které mají za následek proudění vzduchu do formy. Přítomnost vzduchu v dutině formy by měla za následek přítomnost dutin ve vytvrzeném produktu. Při použití RTM technologie by netěsnosti vedly pouze k úniku pryskyřice. [17]

3.5 Pultruze

Pultruze představuje finančně efektivní, automatizovaný proces výroby kompozitních profilů o konstantním průřezu. Na začátku procesu jsou vlákna výztuhy odmotána z cívek. Vlákna jsou poté naváděna do pryskyřičné koupele, kde jsou impregnována zvolenou pryskyřicí. Naimpregnovaná vlákna jsou poté tvarována do požadovaného tvaru výsledného profilu a v této fázi dochází také k odstranění přebytečné pryskyřice. Materiál je poté vtahován do předehřáté ocelové vytvrzovací hlavy, jejíž tvar odpovídá finálnímu tvaru vyráběného dílu. Profil je nepřetržitě tažen z formy konstantní rychlostí a na výstupu je horký, plně vytvrzený. Následně probíhá chlazení profilu a profil je řezán na požadované délky. [17]

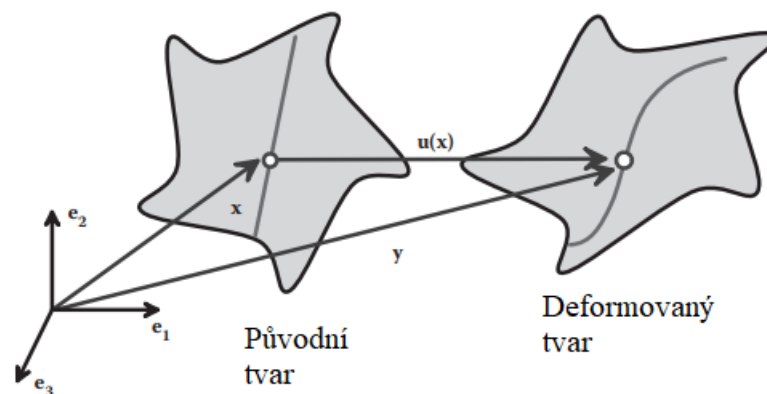


Obrázek 8: Technologie pultruze [21]

4 FEM ANALÝZA

V praxi nejběžnější konstrukční výpočty zahrnují komponenty se složitou 3D geometrií. Často je také nutno vypočítat inherentně nelineární jevy, jako je kontakt, velké změny tvaru nebo nelineární chování materiálu. Tyto problémy mohou být vyřešeny pouze použitím počítačových simulací. FEM analýza představuje hojně používanou a velice univerzální techniku simulace deformací pevných látek. FEM neboli metoda konečných prvků je počítačová technika pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. Použití této metody spočívá v předvídání deformací a napětových polí v tělesech, která jsou vystavena působení vnějších sil. FEM lze také použít pro řešení problémů, jako jsou například tok tekutin, přenos tepla, elektromagnetická pole, difúze a mnoho dalších jevů. [22]

Obrázek níže vizualizuje těleso deformované vlivem působení vnějšího zatížení. Jakmile je vnější zatížení aplikováno, dojde k posunutí každého bodu tělesa. Vektor posunutí $u(x)$ určuje posunutí bodu v poloze x v nedeformovaném tělese. Jakmile je tento vektor určen, lze poté odvodit deformační a napětové pole v tělese. [22]



Obrázek 9: Vizualizace deformovaného tělesa [22]

Pro nastavení výpočtu je nutno zadat následující parametry:

- Geometrie tělesa – provede se vygenerování sítě konečných prvků pro dané těleso
- Vlastnosti materiálu
- Způsob zatížení aplikovaného na těleso – provádí se zadáním okrajových podmínek

- V případě, že analýza zahrnuje kontaktní plochy mezi dvěma pevnými látkami, je nutno specifikovat povrchy, které vzájemně přicházejí do styku (např. stanovit třecí koeficient)
- V případě dynamické analýzy je nutné specifikovat počáteční podmínky [22]

4.1 Uzly, prvky a sítě

4.1.1 Síť konečných prvků pro 2D a 3D komponenty

Síť konečných prvků je používána pro stanovení geometrie tělesa a určení posunutí uvnitř tělesa. Sítě mohou být trojrozměrné, ale mohou být použity i 2D sítě konečných prvků pro modelaci jednodušších deformací. Sítě konečných prvků jsou definovány uzly a prvky. [22]

4.1.2 Uzly

Uzly představují body, které tvoří výsledný FEM model. Uzly mají tyto vlastnosti:

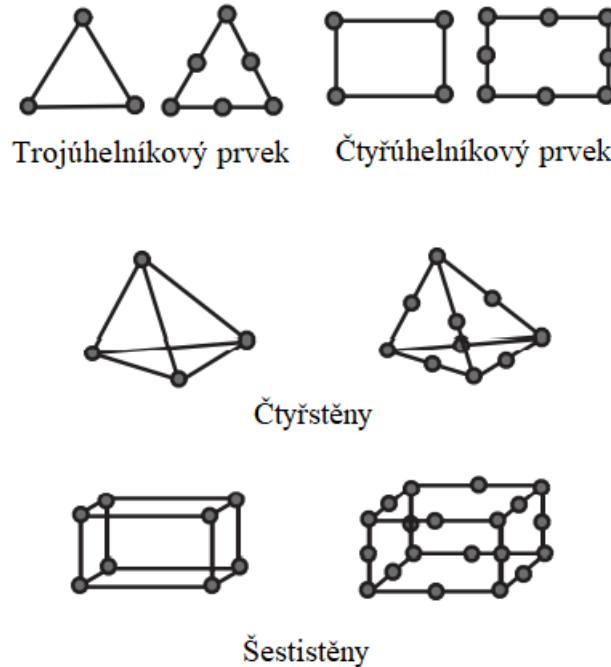
- Číslo – každému uzlu je přiděleno číslo, které slouží k jeho identifikaci
- Souřadnice – v 3D modelu je uzel definován třemi souřadnicemi, ve 2D modelu je uzel definován dvěma souřadnicemi, které stanovují polohu uzlu v nezdeformovaném tělese
- Stupně volnosti – každému uzlu je přiřazeno posunutí, rotace, napětí, teplota atd. [22]

4.1.3 Prvky

Prvky rozdělují těleso do samostatných oblastí. Každý prvek má následující vlastnosti:

- Číslo - každému prvku je přiděleno číslo, které slouží k jeho identifikaci
- Geometrie – prvek může být definován mnoha tvary. Ve 2D modelech jsou prvky většinou trojúhelníkové, nebo čtyřúhelníkové. Ve 3D modelech se prvky vyskytují nejčastěji jako čtyřstěny, šestistěny nebo klíny. Mezi speciální prvky se řadí vazníky, nosníky a skořepiny.
- Soubor uzlů připojených k prvku – každý prvek je definován sadou uzlů
- Schéma interpolace prvků

- Body integrace
- Vztah mezi napětím a deformací a vlastnosti materiálu



Obrázek 10: Základní typy 2D a 3D prvků [22]

4.1.4 Speciální prvky – nosníky, desky, skořepiny a vazníky

Je-li třeba analyzovat těleso se speciální geometrií (např. jednoduchý vazník, konstrukce jednoho nebo více štíhlých nosníku nebo desek), není efektivní pokoušet se vygenerovat 3D síť konečných prvků. [22]

- Vazníky – předpokládá se, že prvky jsou ve stavu jednoosé napjatosti nebo komprese, řeší se jen posunutí koncových uzlů elementů
- Nosníky – počítá se s rotací a posunutím průřezu podél nosníku
- Desky a skořepiny – počítá se s rotací a posunutí [22]

4.1.5 Struktura nástroje pro modelování konečných prvků

Nástroj pro modelování konečných prvků se skládá ze tří klíčových komponent:

- pre-processor
- výpočetní modul
- post-processor [23]

FEM proces začíná od pre-processor fáze, kde je vytvářen vstupní soubor. Pre-processor program obsahuje soubory pokynů, činností nebo programů, které jsou potřebné pro vytvoření vstupních souborů potřebných pro provedení dalšího kroku. Tyto soubory vstupů a příkazů jsou ukládány do klíčového souboru. Akce prováděné v pre-processoru mohou být následující:

- Vytváření modelu – znázornění fyzického problému do podoby počítačového modelu
- Idealizace fyzického problému na konečné prvky, které jsou potřebné pro následnou analýzu
- Specifikace materiálu modelu a jeho parametrů
- Přiřazení materiálových komponent modelu k prvkům a uzlům
- Návrh a specifikace okrajových podmínek
- Propojení výše uvedených kroků do souboru pro následnou simulaci [23]

Soubor je poté předán do výpočetního modulu FEM Solver. V této fázi jsou stanoveny síly a posuny vyplývající z okrajových podmínek. Výstupem této fáze je výstupní datový soubor, který obsahuje řešení posunutí, sil, napětí atd. Tato data jsou poté předána do post-processoru. [23]

Post-processor využívá výsledky simulační analýzy k další analýze struktury. V této fázi se nachází široká škála možností. Může zahrnovat výpočty vnitřních sil a působení napětí na konstrukci. Umožňuje zobrazení výsledků v grafech, aby bylo možno prezentovat vizuální řešení. V praxi je nutno výslednou analýzu ověřit tak, aby mohly být výstupy modelu považovány za přijatelné. Často je potřeba vrátit se zpět do pre-processor fáze a změnit například hustotu sítě, volbu prvku, okrajových podmínek atd. [23]

5 MECHANIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Pro sendvičové kompozitní materiály jsou typické ortotropní vlastnosti. Vlivem ortotropie dochází k tomu, že vlastnosti materiálu jsou ve třech na sebe kolmých směrech odlišné. Ortotropní materiál má tři navzájem kolmé roviny symetrie. Tento typ materiálu je charakterizován devíti nezávislými materiálovými konstantami. [1,22]

5.1 Hookeův zákon pro ortotropní materiál

Hookeův zákon popisuje vztah mezi napětím a deformací v prostoru. Napětí lze vypočítat jako součin tuhosti C a poměrné deformace ε .

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (1)$$

Rovnice (1) vychází z Hookeova zákona pro jednoosou napjatost:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Pro výpočet poměrné deformace platí, že poměrná deformace se rovná součinu napětí σ a poddajnosti S .

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (3)$$

Poddajnost S je převrácená hodnota tuhosti C .

$$C = S^{-1} \quad (4)$$

Maticový zápis Hookeova zákona pro prostorovou napjatost:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Po dosazení inženýrských konstant E a ν dostaneme tvar matice:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Prvky po stranách diagonály matice se rovnají, jelikož pro daný vztah platí symetrie. Dle symetrie matice poddajnosti tedy platí vztahy:

$$-\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (7)$$

$$-\frac{\nu_{13}}{E_1} = -\frac{\nu_{31}}{E_3} \quad (8)$$

$$-\frac{\nu_{23}}{E_2} = -\frac{\nu_{32}}{E_3} \quad (9)$$

5.2 Materiálové konstanty ortotropního materiálu

Pro charakteristiku ortotropního materiálu se používá 9 nezávislých materiálových konstant:

- Youngův modul pružnosti (E_1, E_2, E_3)
- Modul pružnosti ve smyku (G_{23}, G_{31}, G_{12})
- Poissonovo číslo ($\nu_{23}, \nu_{31}, \nu_{12}$) [22]

Youngův modul pružnosti E představuje míru tuhosti materiálu. Čím větší je hodnota Youngova modulu pružnosti, tím vyšší je tuhost materiálu. Pro stabilní materiál platí podmínka $E > 0$. Youngův modul pružnosti lze určit ze směrnice přímky grafu závislosti napětí na relativním prodloužení.

Modul pružnosti ve smyku G pro smykové namáhání lze analogicky odvodit z Hookeova zákona. Obvykle nabývá nižších hodnot než Youngův modul pružnosti. Je to materiálová konstanta udávající poměr mezi smykovou deformací a zkosením. [22]

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (10)$$

Poissonovo číslo ν představuje poměr mezi příčnou poměrnou deformací a podélnou poměrnou deformací. Poissonovo číslo pro většinu materiálů nejčastěji nabývá hodnot v intervalu $0 - 0,5$. Pro ortotropní materiál jsou Poissonova čísla různá v různých směrech zatížení. [22]

$$\nu_{ij} = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (11)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce bylo zkoumání možnosti modelování mechanických vlastností dílů z kompozitního sendvičového materiálu pomocí FEM analýzy. Úkolem bylo porovnání mechanického chování dvou dílů ze stejného materiálu, které se lišily modelem jádra.

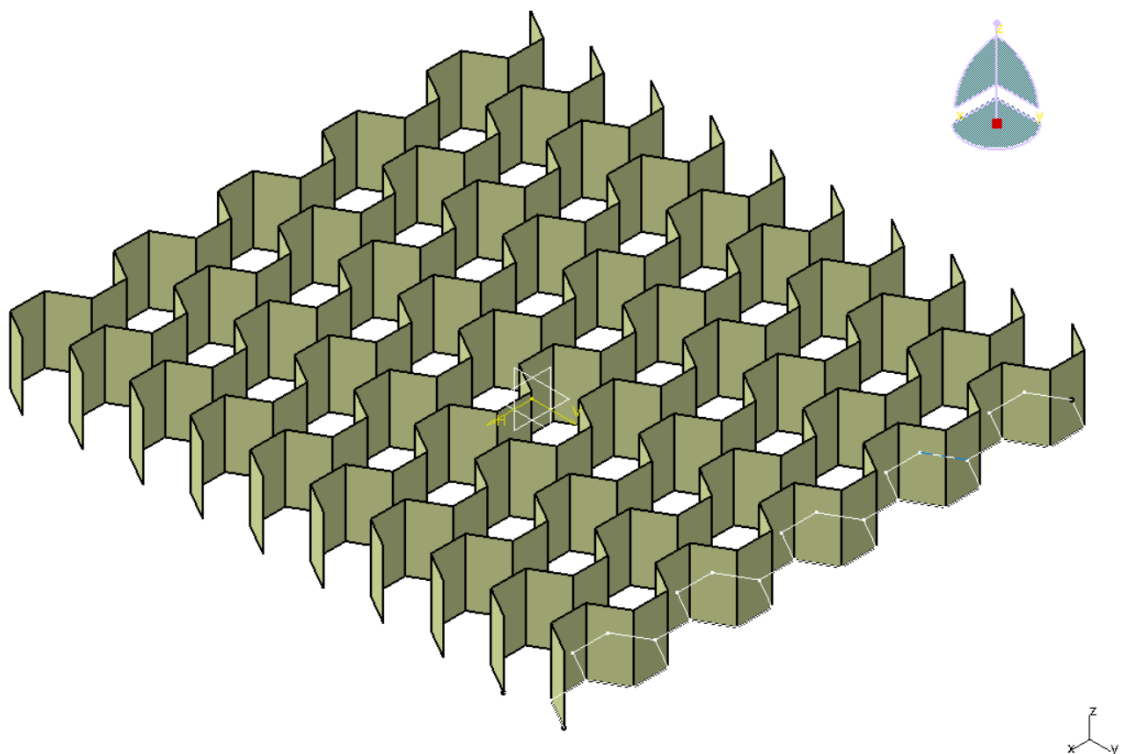
Zásady pro vypracování bakalářské práce jsou:

- Literární přehled
- Návrh numerických modelů
- Řešení modelů
- Vyhodnocení výsledků

7 METODIKA

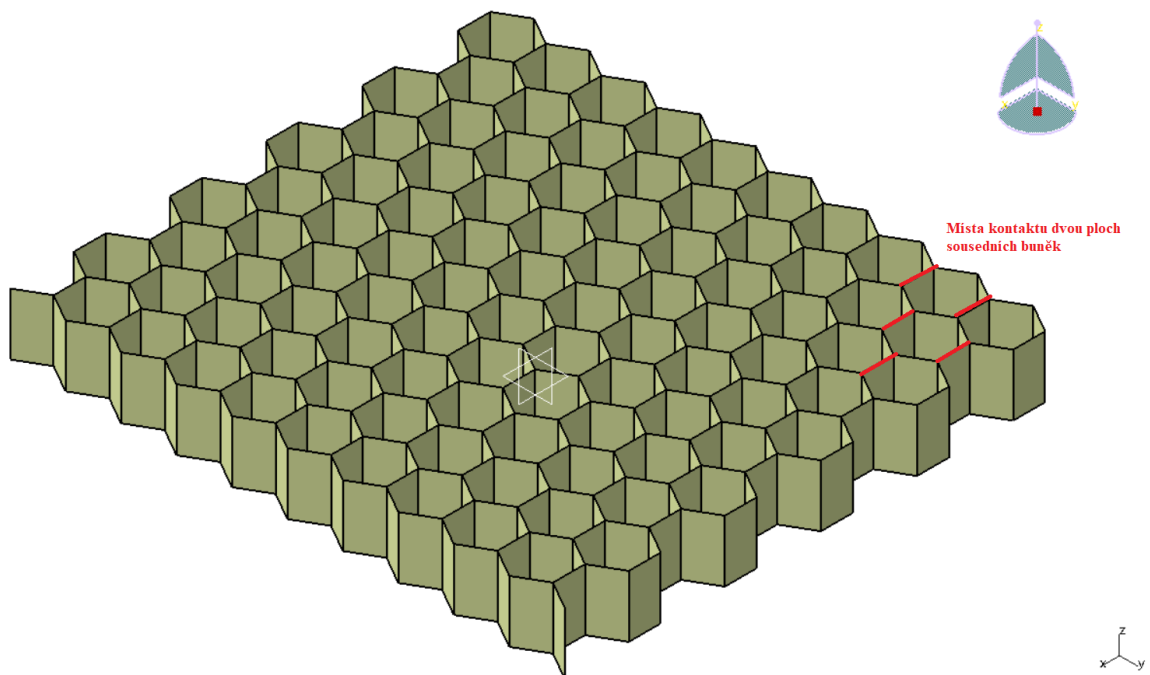
7.1 Model 1

Model, ze kterého je dále vycházeno, byl vytvořen v programu CATIA. Model byl vytvořen v modulu Generative Shape Design. Voštinové jádro bylo vymodelováno ve dvou krocích. V prvním kroku byla pomocí funkce Sketch nakreslena horní část stěn buněk voštiny do roviny xy . Pomocí funkce Extrude byla skica vytažena ve směru osy z v délce 10 mm. Následně bylo vytažení pomocí funkce Pattern zkopírováno po celé ploše.



Obrázek 11: Postup tvorby voštinového jádra

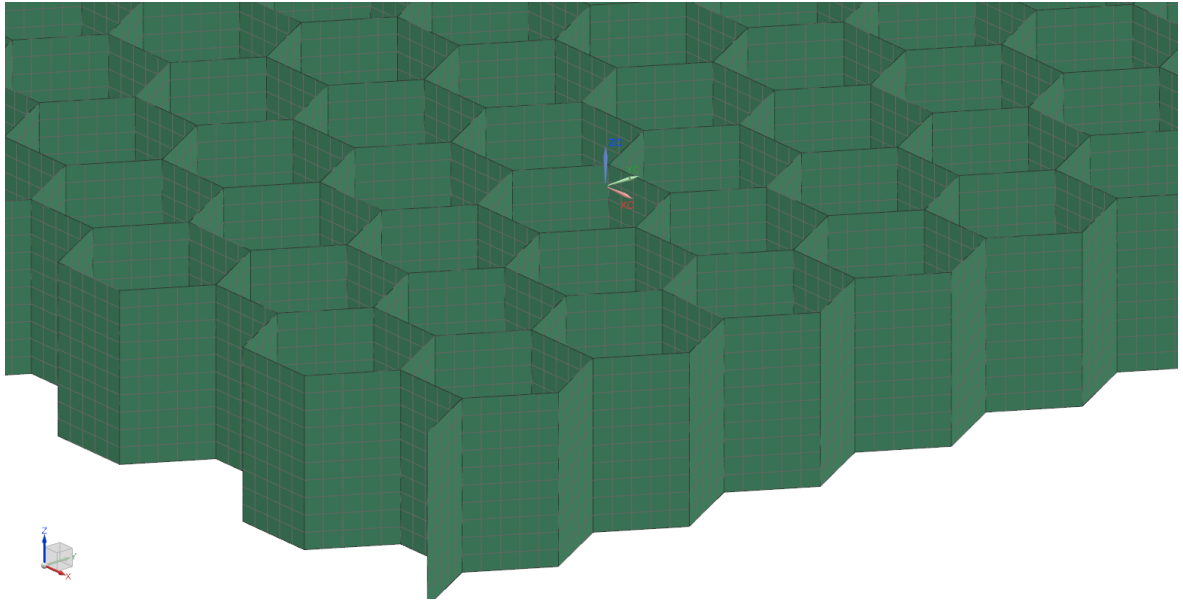
Ve druhém kroku byla pomocí skici dokreslena druhá polovina voštinových buněk, funkcí Extrude vytažena a funkcí Pattern zkopírována po ploše. Pomocí funkce Join byly obě části spojeny v jeden celek. Jádru bylo modelováno na dvě části z důvodu zachování kontaktu dvou na sebe přiléhajících ploch sousedních buněk voštiny. Model byl navržen tak, aby voštinové jádro obsahovalo 10 buněk ve směrech x a y . Průměr d kružnice vepsané buňkám voštiny byl 9 mm.



Obrázek 12: Model voštinového jádra

Model, který byl vytvořen v programu CATIA, byl importován do softwaru NX 12.0. V tomto programu byly hliníkové voštině přiřazeny materiálové vlastnosti. Materiálem voštinového jádra byl zvolen hliník A356, který byl vybrán z knihovny předem nadefinovaných materiálů programu NX. Youngův modul pružnosti hliníku A356 je 70 000 MPa a Poissonovo číslo je udáno 0,33.

V dalším kroku byla vytvořena FEM síť. FEM síť je tvořena uzly a elementy. Při definování sítě byl jako typ elementu zvolen čtyřúhelník s osmi uzly. Velikost elementu byla programem navržena 2,27 mm. Tato velikost elementů byla vzhledem k celkovým rozměrům voštinového jádra a za účelem zpřesnění výsledků upravena. Pro další výpočty bylo tedy počítáno s elementy o velikosti 1 mm. V dalším kroku bylo potřeba nastavit tloušťku sítě. Tloušťka byla zvolena 0,03 mm. Tato hodnota odpovídá tloušťkám běžně používaným hliníkovým voštinovým jader.

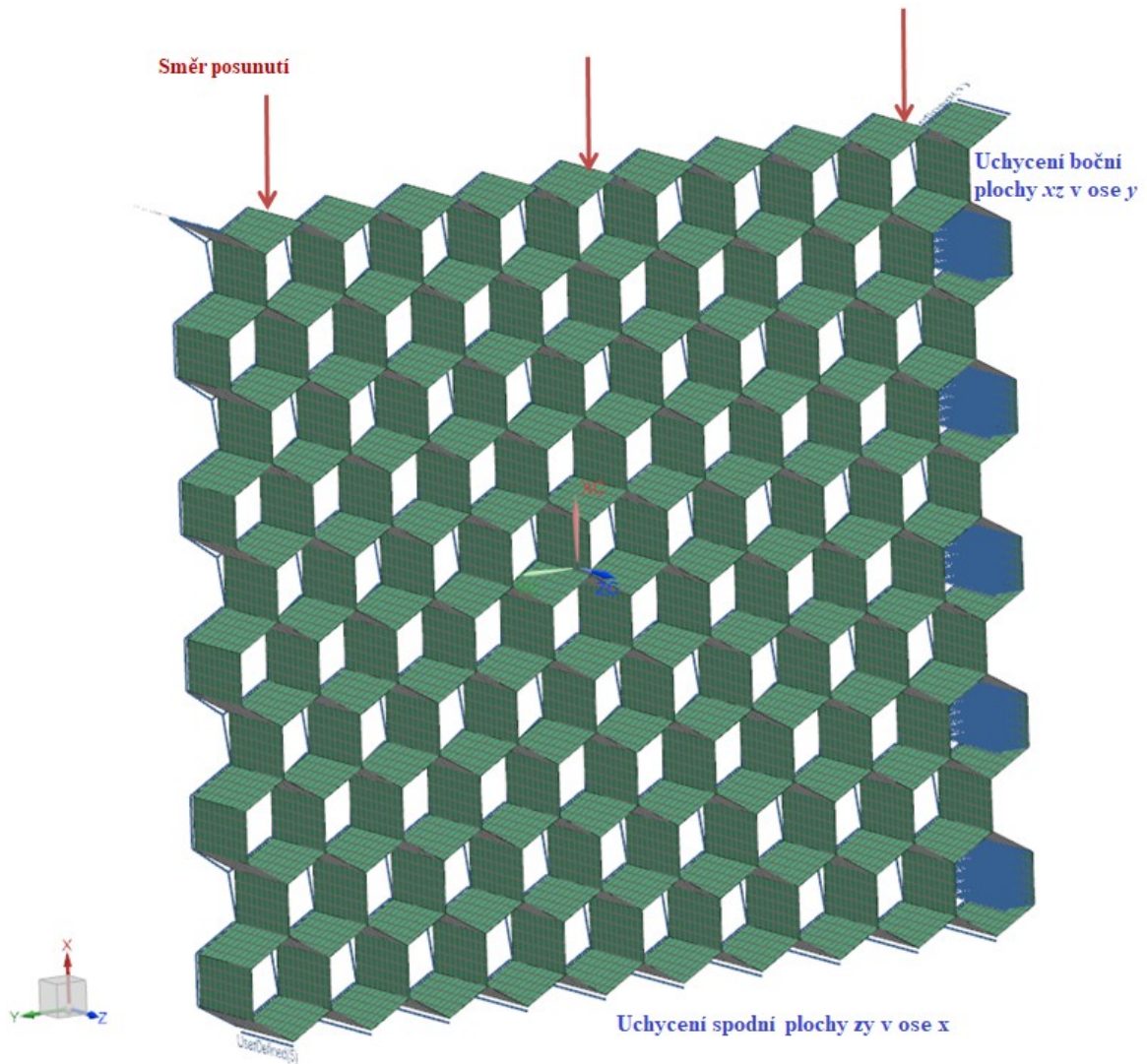


Obrázek 13: Detail FEM sítě voštinového jádra

Voštinové jádro jako celek kompozitního materiálu má ortotropní vlastnosti. Je proto nutné vypočítat materiálové konstanty ve třech na sebe kolmých směrech. Nejprve byla voština zatížena na tlak v ose z , následně v osách x a y .

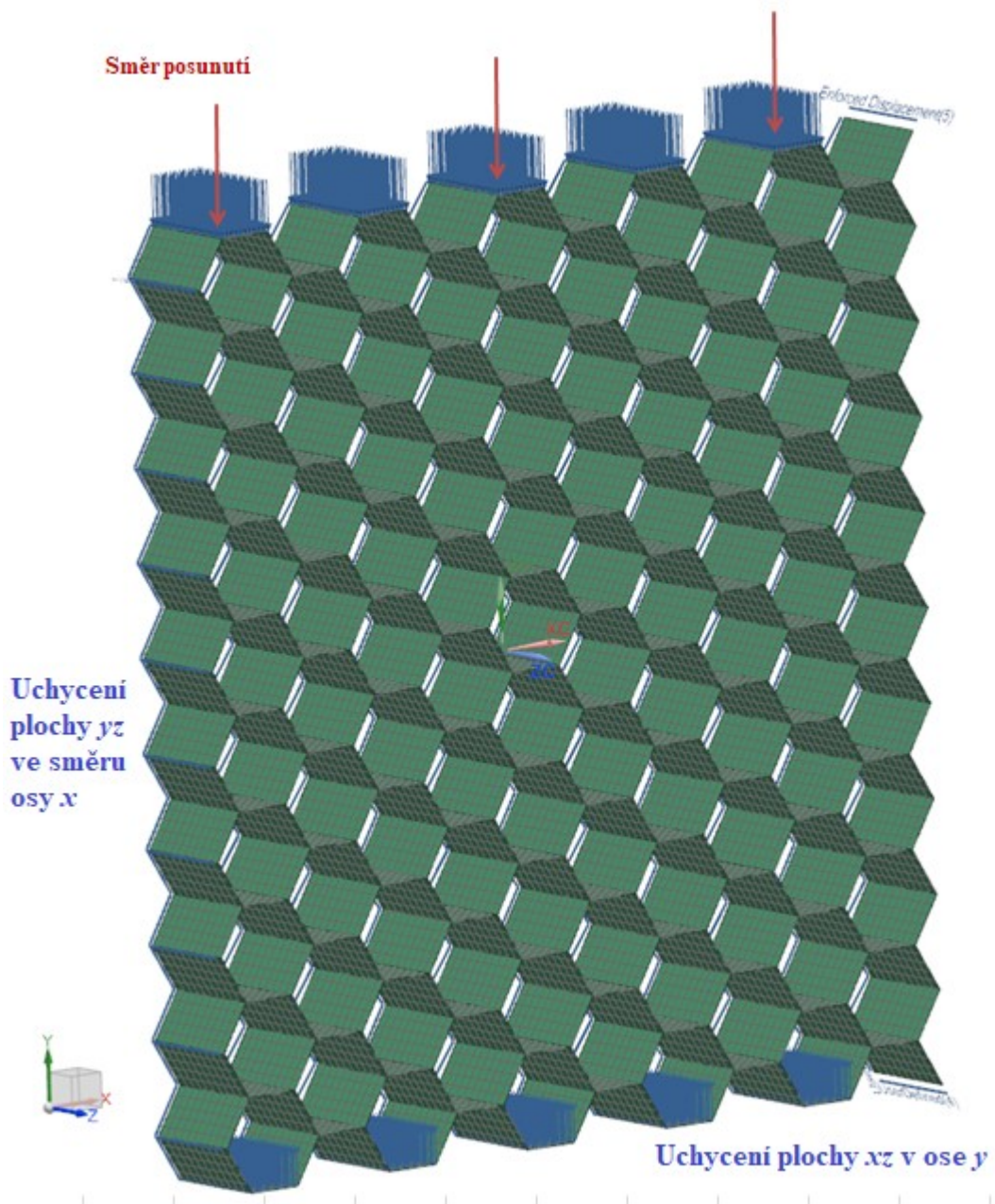
Pro určení materiálových konstant bylo nejdříve jádro zatíženo ve směru osy z . Horní plocha xy byla zatížena posunutím 0,1 mm v záporném směru osy z . U spodní plochy xy bylo zafixováno posunutí ve směru osy z . V bočních plochách xz a yz byla na jedné straně zafixována posunutí ve směrech normál jednotlivých ploch. V boční ploše xz bylo tedy zafixováno posunutí ve směru y a v boční ploše yz posunutí ve směru osy x . Výsledky této analýzy lze najít v Tabulce 1 jako Řešení 1.

Dále byl model zatížen ve směru osy x . Boční hrany voštinového jádra v rovině yz byly zatíženy posunutím 0,1 mm v záporném směru osy x . Jádro bylo uchyceno v boční ploše yz , boční ploše xz a ve spodní ploše xy vždy ve směrech kolmých k jednotlivým plochám. Výsledky této analýzy lze nalézt v Tabulce 1 jako Řešení 2.



Obrázek 14: Okrajové podmínky pro Řešení 2

Ve třetím případě byla boční strana jádra zatížena v záporném směru osy y posunutím 1 mm. Jádro bylo uchyceno v boční ploše xz , v bočních hranách roviny yz a spodní ploše xy . Výsledky této analýzy lze nalézt v Tabulce 1 jako Řešení 3.



Obrázek 15: Okrajové podmínky pro Řešení 3

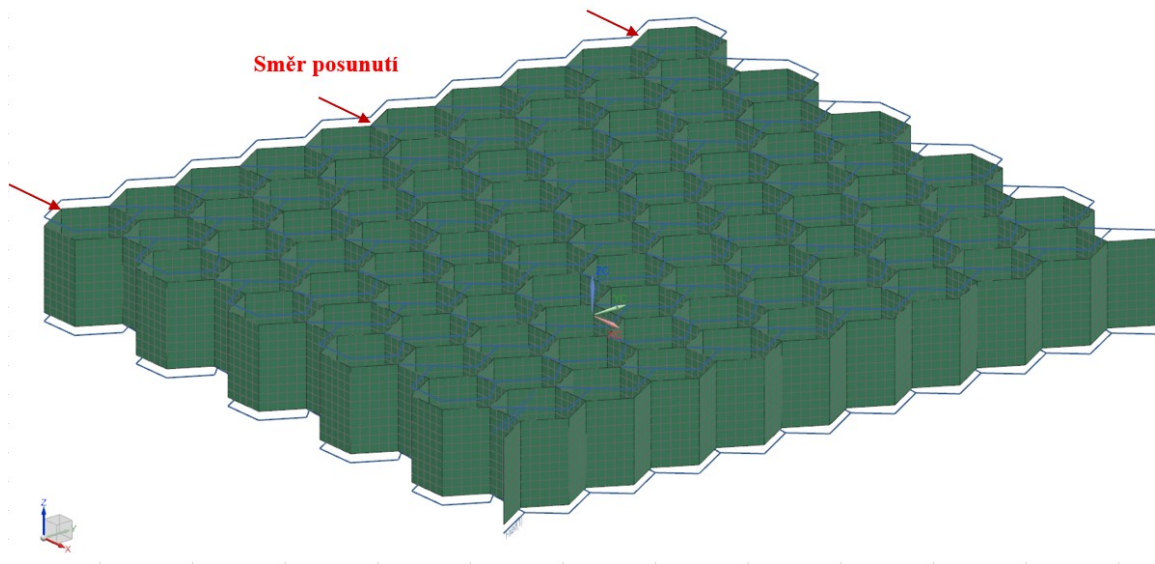
Po spuštění analýzy je možno vypočítat Youngovy moduly pružnosti a Poissonova čísla. Nejprve bylo nutno zjistit celkovou reakční sílu. Celková hodnota reakční síly byla získána sečtením reakčních sil v jednotlivých uzlech uchycené plochy.

Dle vzorce (12) bylo vypočteno tlakové napětí v osách x , y a z .

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (12)$$

Ze získaného tlakového napětí byl vypočten dle vzorce (2) Youngův modul pružnosti v jednotlivých osách. Dále byly dle vzorce (11) zjištěny hodnoty Poissonových čísel.

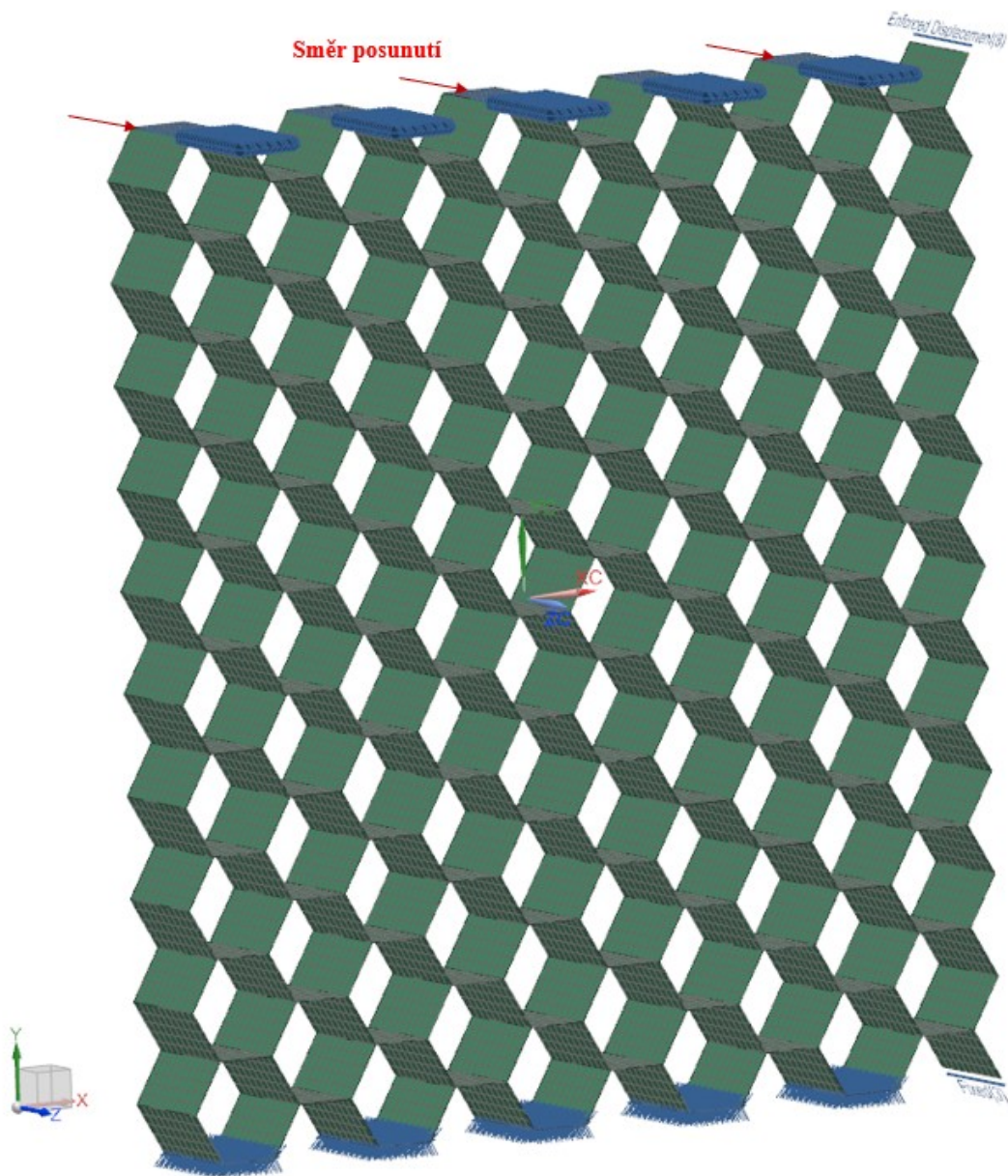
Voštinové jádro bylo zatíženo na smyk, aby mohly být vypočteny moduly pružnosti ve smyku. Spodní plocha xy byla pevně uchycena a na horní plochu bylo aplikováno posunutí o velikosti 1 mm v kladném směru osy x . Po spuštění analýzy bylo možno vypočítat modul pružnosti ve smyku ve směru osy x . Výsledky této analýzy lze nalézt v Tabulce 2 jako Řešení 4.



Obrázek 16: Okrajové podmínky pro Řešení 4

Pro výpočet modulu pružnosti ve smyku ve směru osy y byly okrajové podmínky nastaveny obdobně. Spodní plocha xy voštinového jádra byla pevně uchycena a horní plocha xy voštinového jádra byla zatížena posunutím 1 mm, tentokrát ve směru osy y . Výsledky této analýzy lze nalézt v Tabulce 2 jako Řešení 5.

Modul pružnosti ve smyku ve směru osy z byl vypočítán, kdy okrajové podmínky byly nastaveny následovně. Boční plocha xz voštinového jádra byla pevně uchycena a protilehlá boční plocha xz byla zatížena posunutím 1 mm ve směru osy z . Výsledky této analýzy lze nalézt v Tabulce 2 jako Řešení 6.



Obrázek 17: Okrajové podmínky pro Řešení 6

Při výpočtu jednotlivých modulů pružnosti ve smyku byla nejprve zjištěna celková reakční síla součtem reakčních sil v jednotlivých uzlech uchycení. Dále dle vzorce (13) bylo vypočítáno smykové napětí.

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (13)$$

Modul pružnosti ve smyku byl získán dosazením smykového napětí do vzorce (10). Tímto způsobem bylo získáno všech devět materiálových konstant (viz Tabulka 1, Tabulka 2).

Pro ověření správnosti výpočtu Poissonových čísel bylo dosazeno do rovnic symetrie matice poddajnosti dle vzorců (7), (8) a (9).

Tabulka 1: Materiálové konstanty – část 1.

	Youngův modul pružnosti E_i [MPa]	Poissonova čísla ν_{ij}
Řešení 1	$E_z = 632,300$	$\nu_{zx} = 0,332$
		$\nu_{zy} = 0,331$
Řešení 2	$E_x = 0,017$	$\nu_{xy} = 0,890$
		$\nu_{xz} = 0,890 \cdot 10^{-5}$
Řešení 3	$E_y = 0,019$	$\nu_{yx} = 1,013$
		$\nu_{yz} = 1,02 \cdot 10^{-5}$

Tabulka 2: Materiálové konstanty – část 2.

	Smykový modul pružnosti G_{ij} [MPa]
Řešení 4	$G_{xy} = 2,11 \cdot 10^{-3}$
Řešení 5	$G_{yz} = 119,50$
Řešení 6	$G_{zx} = 54,8$

7.2 Model 2

Model 2 je tvořen voštinovým jádrem, které je stejné jako v Modelu 1, a dvěma potahy. Nejdříve bylo nutno potahové vrstvy slepit s voštinovým jádrem. Poté byl potahové vrstvě přiřazen materiál. Potahová vrstva byla nadefinována jako laminát obsahující dvě vrstvy. Vrstvy byly tvořeny tkaninou. Potahová vrstva je tvořena maticí a vlákny.

Pro matici potahu byly zadány tyto vlastnosti:

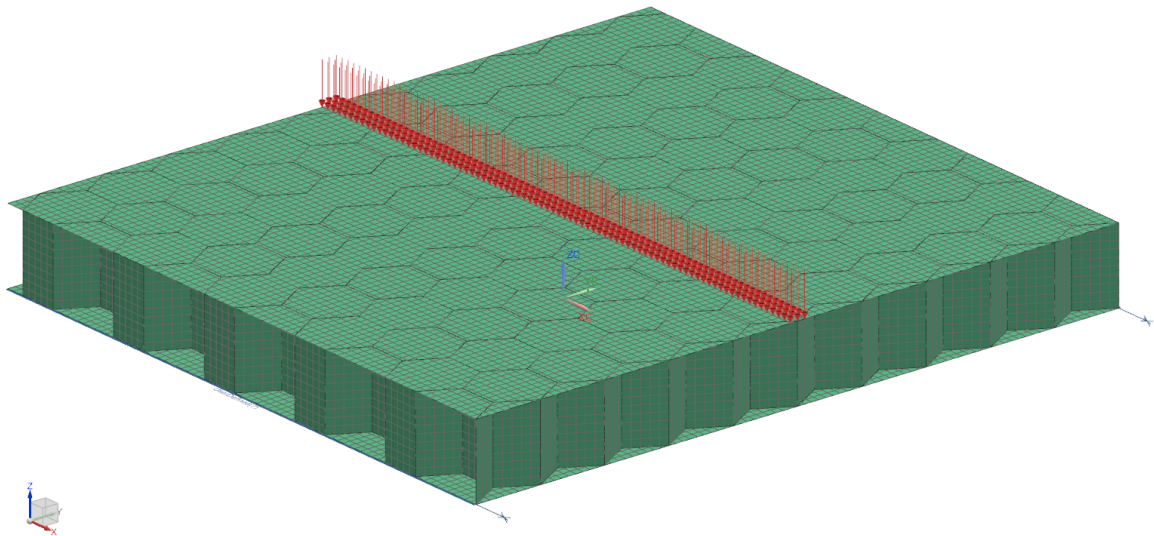
- Youngův modul pružnosti v tahu: 4 000 MPa
- Poissonovo číslo: 0,33
- Objemové zastoupení matrice: 55 %

Pro vlákna potahu byly zadány tyto vlastnosti:

- Youngův modul pružnosti v tahu: 230 000 MPa
- Poissonovo číslo: 0,2
- Objemové zastoupení vláken: 45 %

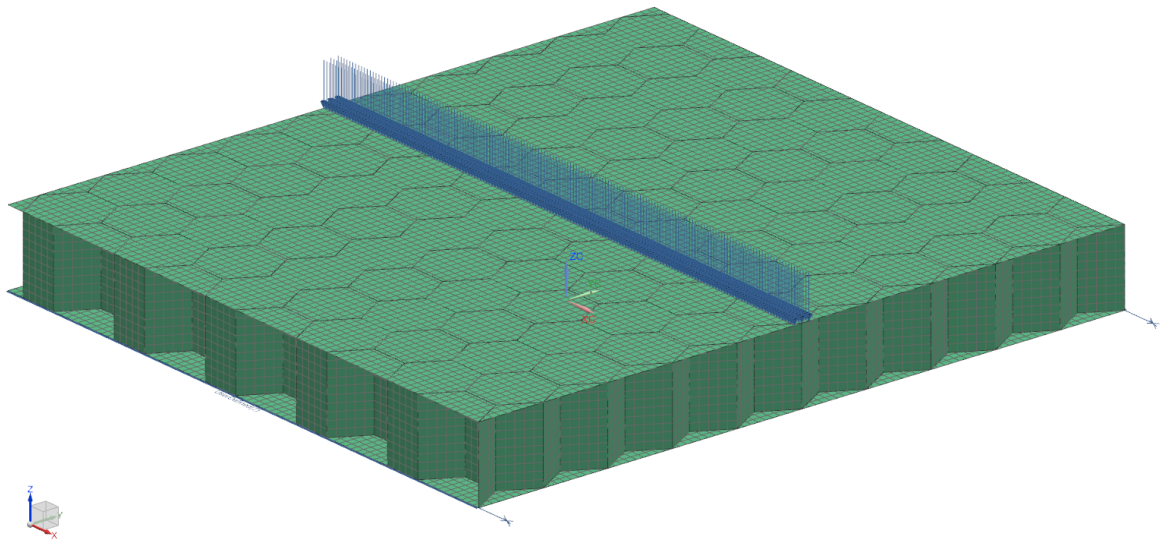
Jednotlivé vrstvy vůči sobě nebyly pootočený. Pro každou vrstvu byla nadefinována tloušťka 0,5 mm. Celková tloušťka jedné potahové vrstvy tedy činila 1 mm.

Pro celý model byly následně zvoleny okrajové podmínky. U hrany spodní plochy modelu byla odebrána posunutí ve směrech os y a z . V krajním bodě této hrany bylo odebráno posunutí ve směru osy x . V protilehlé hraně spodní plochy bylo zafixováno posunutí ve směru osy z , a krajnímu bodu bylo odebráno posunutí ve směru osy x . Horní potahová vrstva byla zatížena silou o velikosti 1 N v záporném směru osy z .



Obrázek 18: Silové zatížení Modelu 2

Model 2 byl zatížen posunutím 1 mm v záporném směru osy z . Uchycení tělesa zůstalo stejné jako v předchozím případě při zatížení silou.



Obrázek 19: Zatížení posunutím Modelu 2

7.3 Model 3

V případě Modelu 3 byl model voštinového jádra nahrazen modelem plného bloku. Tento model byl vytvořen v programu CATIA. Rozměry Modelu 3 odpovídaly rozměrům Modelu 2. Kvádrový blok byl vytvořen z náčrtu o rozměrech 90x80,54 mm a byl vytažen do výšky 10 mm.

Model 3 byl převeden do programu NX 12.0. Materiál voštinového jádra byl v programu nově vytvořen. Nově vytvořené jádro bylo nadefinováno jako ortotropní materiál a byly mu přiřazeny materiálové konstanty získané z FEM analýzy Modelu 1. Hodnoty materiálových konstant přiřazované ortotropnímu jádru lze najít výše v Tabulce 1 a Tabulce 2.

Orthotropic Material

Property View

All Properties

Name - Description

Jadro

Label 3

Description

Categorization

Properties

Mass Density (RHO) 0 kg/mm³

Mechanical

Young's Modulus (Ei)

Young's Modulus (E1) 0.01669 MPa

Young's Modulus (E2) 0.019 MPa

Young's Modulus (E3) 632.3 MPa

Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NUij)

Poisson's Ratio (NU12) 0.89

Poisson's Ratio (NU23) 0.0000102

Poisson's Ratio (NU13) 0.0000089

Shear Modulus (Gij)

Shear Modulus (G12) 0.00211 MPa

Shear Modulus (G13) 54.8 MPa

Shear Modulus (G23) 119.5 MPa

Structural Damping Coefficient (GE)

Stress-Strain Related Properties

Stress-Strain Input Data Type Engineering Stress-Strain

Stress-Strain (H) MPa

Card Name MAT3/MAT8/MAT11

OK Cancel

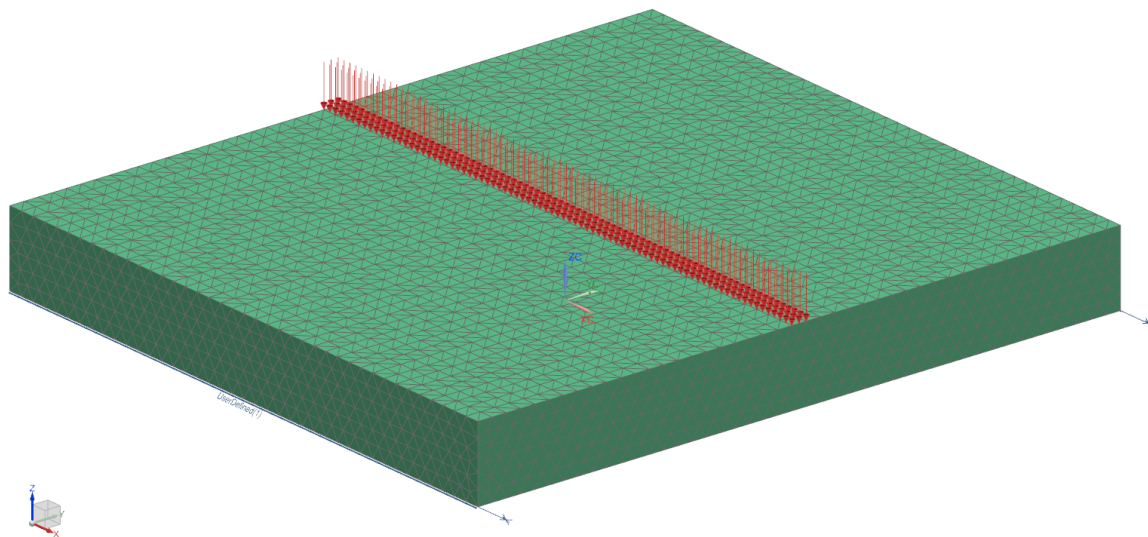
Obrázek 20: Materiálové konstanty ortotropního jádra Modelu 3

Horní a dolní ploše kvádra byly přiřazeny vlastnosti potahové vrstvy. Potahová vrstva byla nadefinována stejně jako v Modelu 2.

Následně proběhla tvorba FEM sítě. Pro potahové vrstvy byla použita 2D síť tvořená trojúhelníkovými elementy o rozměru 2 mm. Pro samotné jádro byla vytvořena 3D síť tvořená čtyřstěny o rozměrech 2 mm.

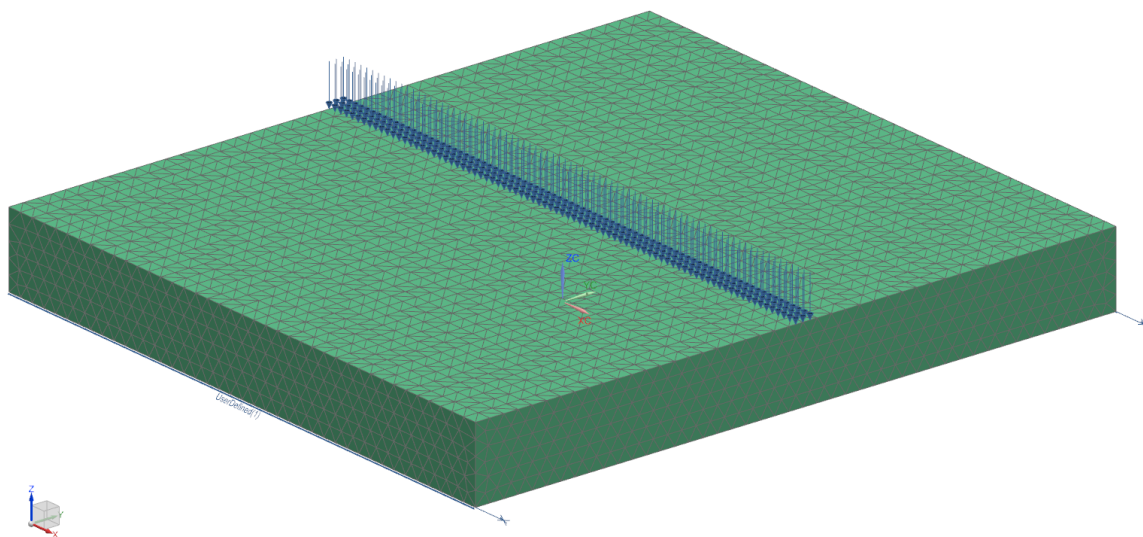
Okrajové podmínky byly nastaveny stejně jako v případě kompletního Modelu 2. U hrany spodní plochy modelu byla odebrána posunutí ve směrech os y a z . V krajním bodě této hrany bylo odebráno posunutí ve směru osy x . V protilehlé hraně spodní plochy bylo

zafixováno posunutí ve směru osy z , a krajnímu bodu bylo odebráno posunutí ve směru osy x . Horní potahová vrstva byla zatížena silou o velikosti 1 N v záporném směru osy z .



Obrázek 21: Silové zatížení Modelu 3

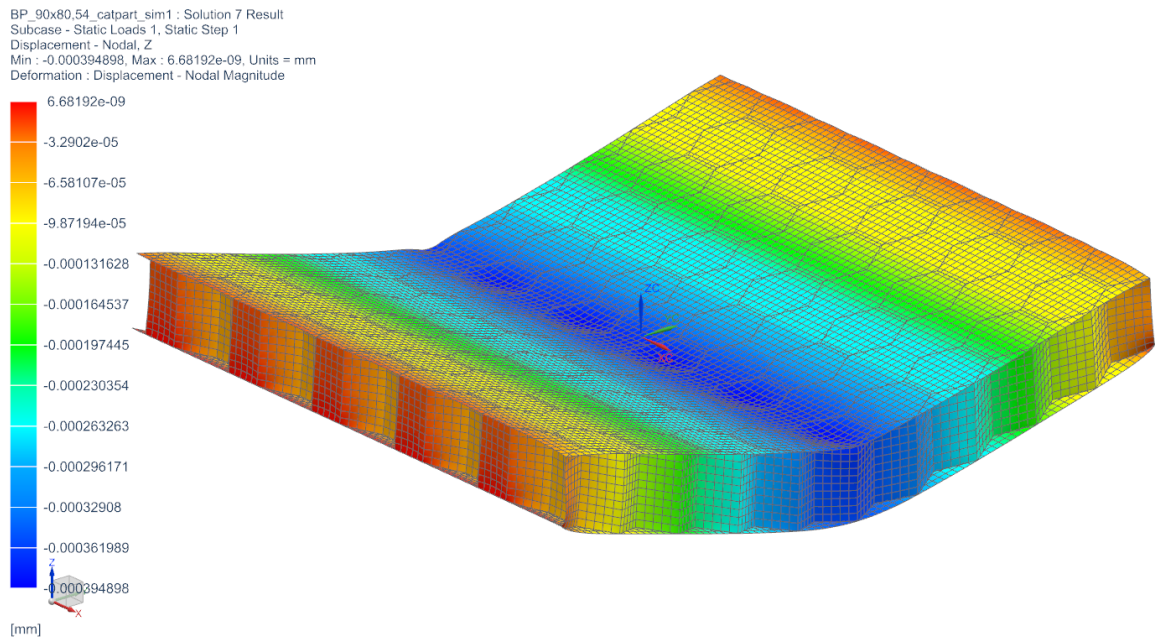
Nakonec byl Model 3 zatížen posunutím 1 mm v záporném směru osy z . Uložení tělesa zůstalo stejné jako v předchozím případě.



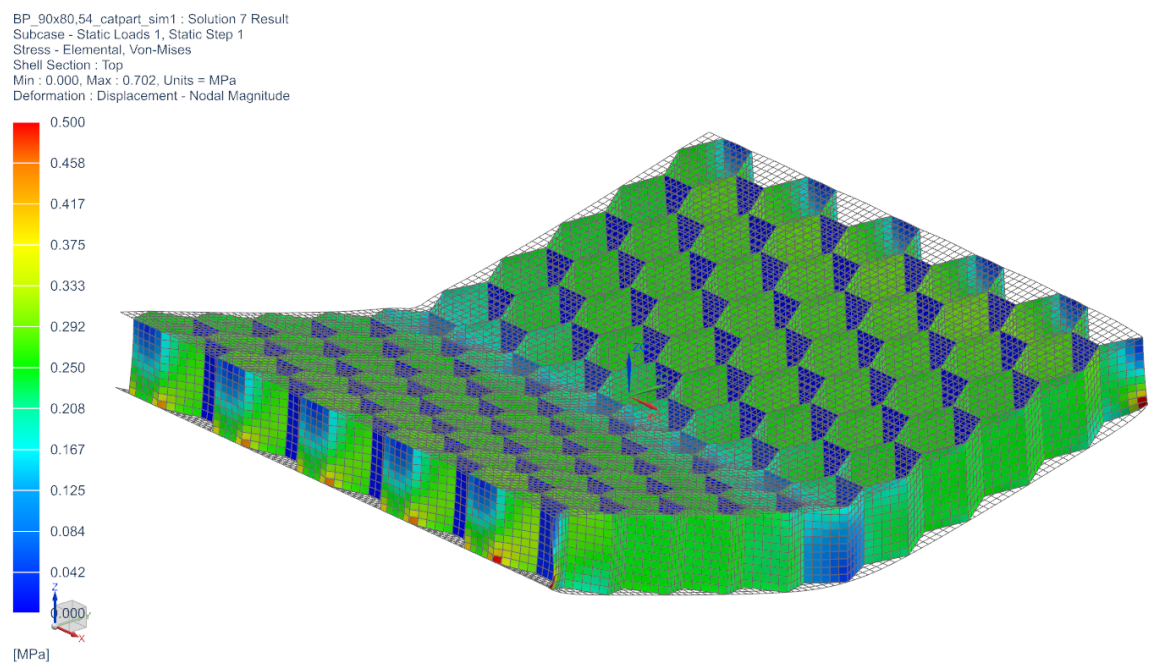
Obrázek 22: Zatížení posunutím Modelu 3

8 VÝSLEDKY ANALÝZY

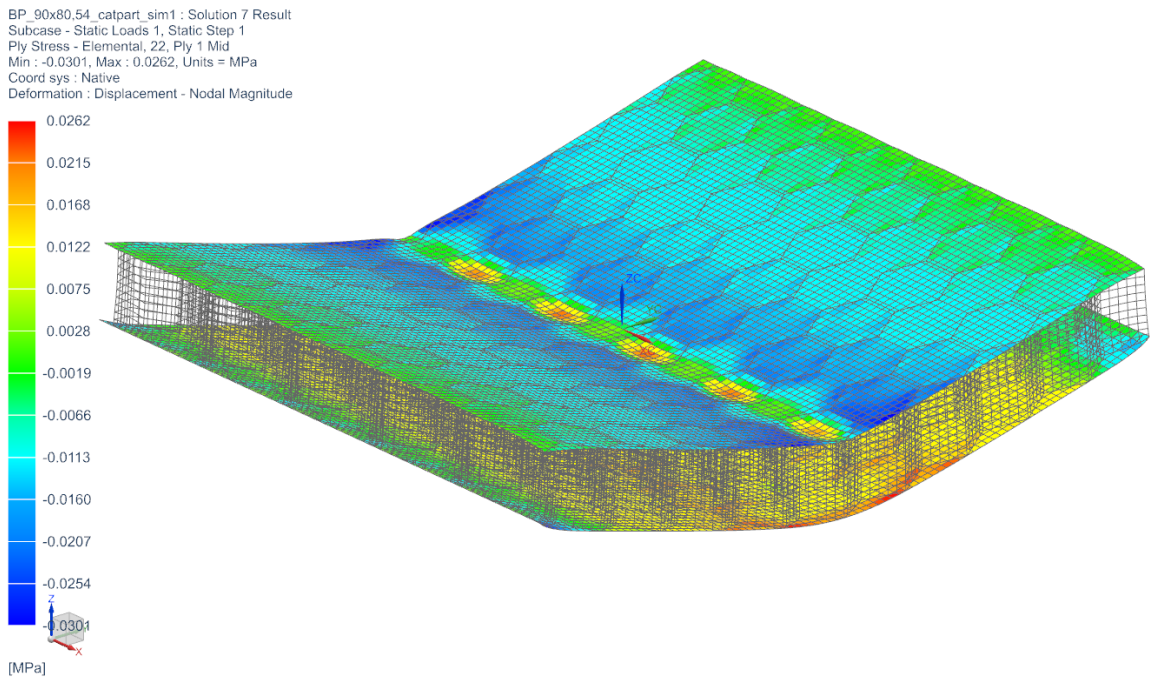
8.1 Model 2



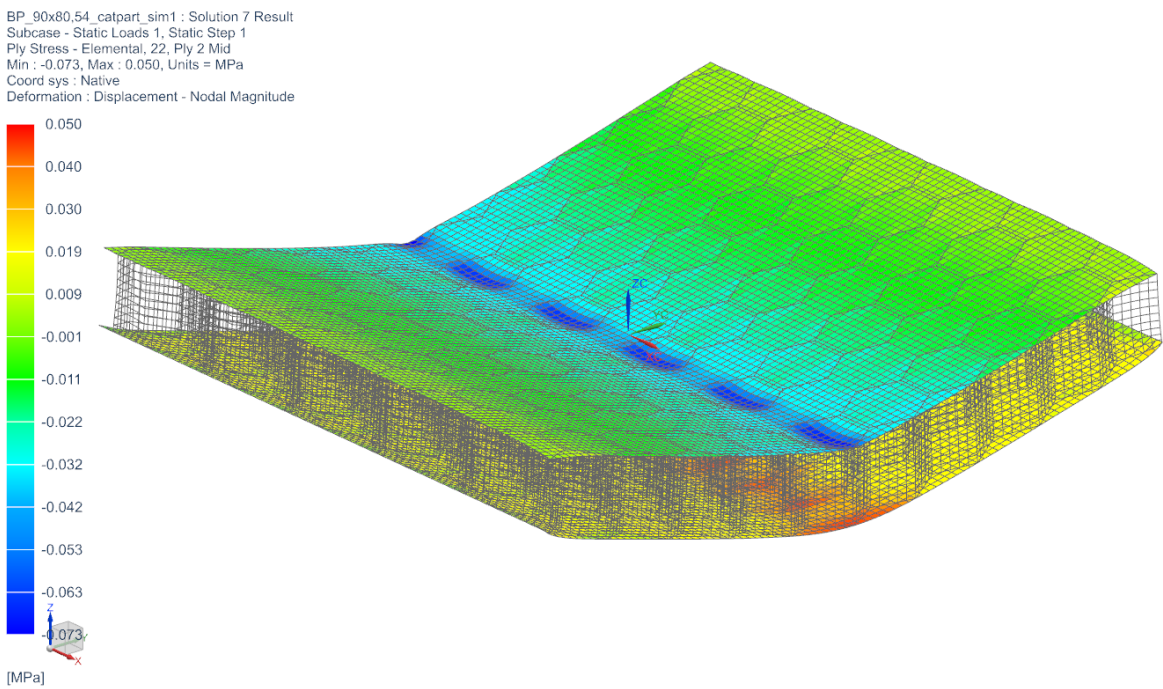
Obrázek 23: Posunutí [mm] Modelu 2 v ose z po zatížení silou
(zobrazení deformací zvětšeno 3000x)



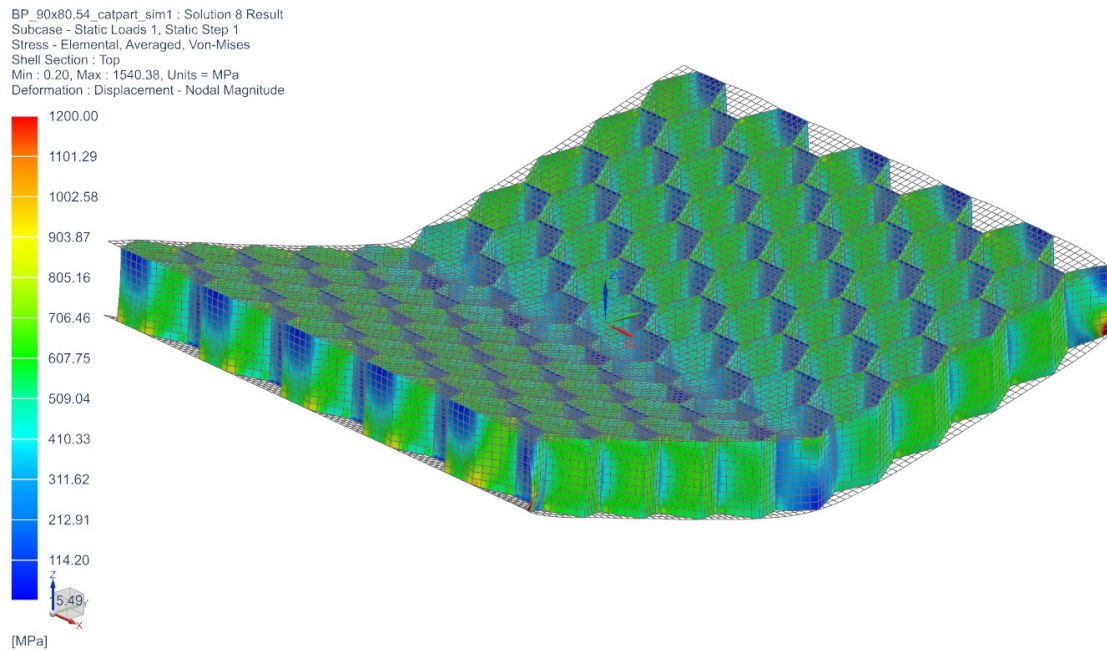
Obrázek 24: Von – Misesovo napětí [MPa] voštinového jádra po zatížení silou
(zobrazení deformací zvětšeno 3000x)



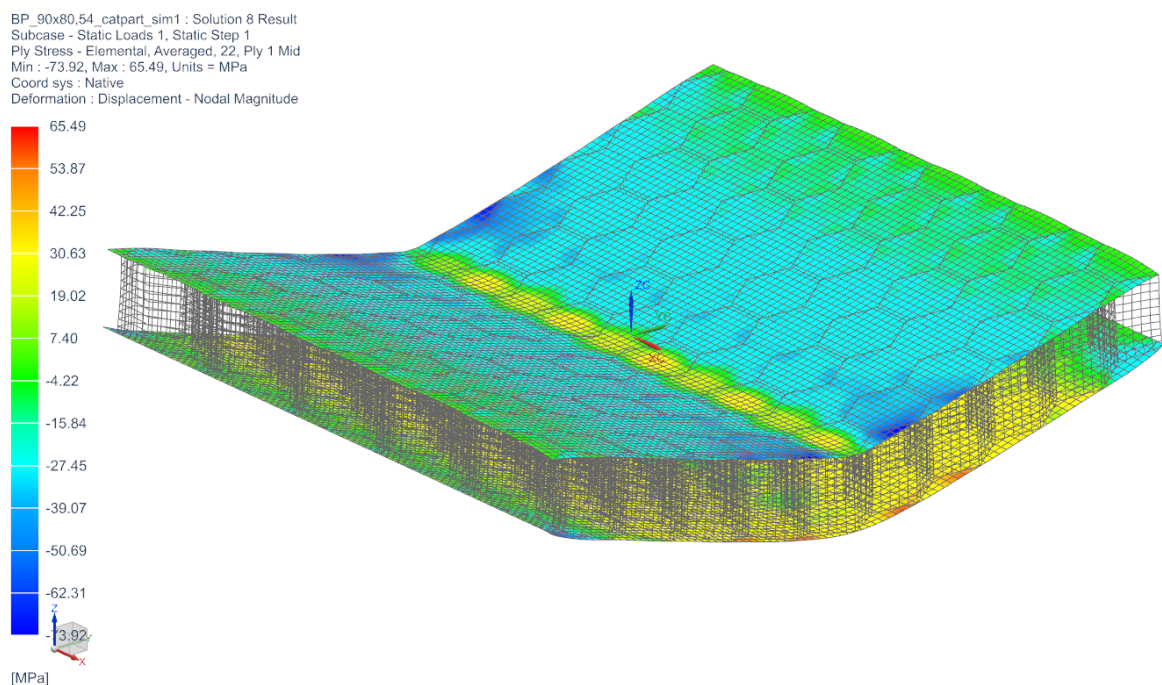
Obrázek 25: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnitřní vrstvy potahu po zatížení silou
 (zobrazení deformací zvětšeno 3000x)



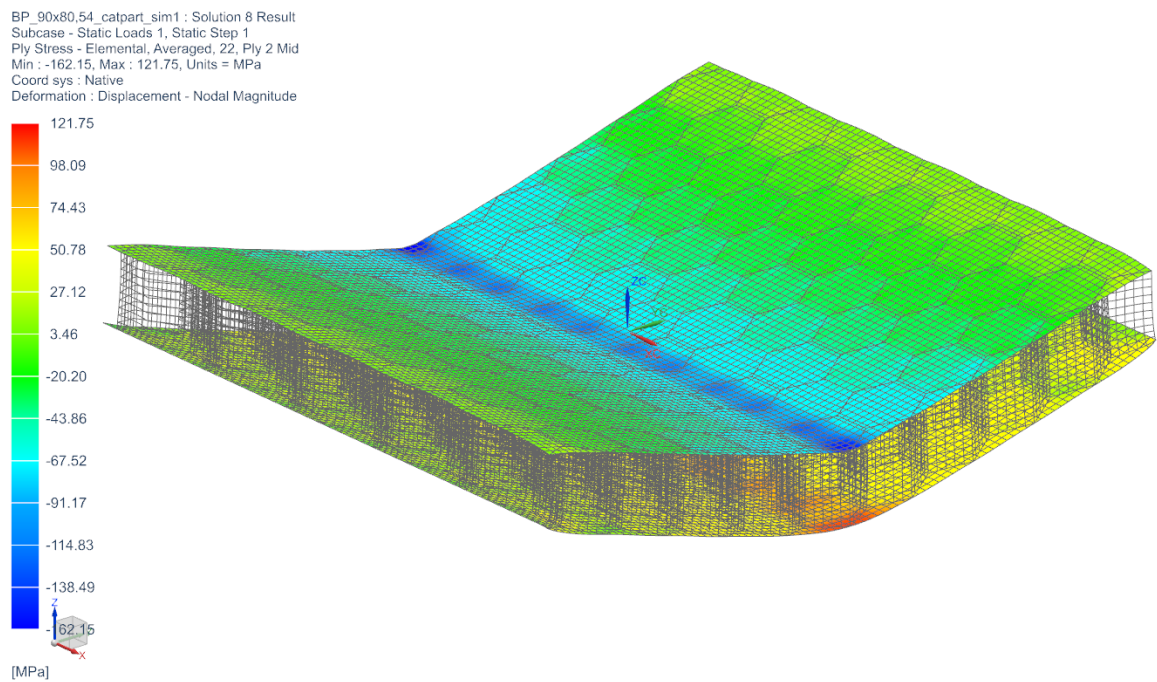
Obrázek 26: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnější vrstvy potahu po zatížení silou
 (zobrazení deformací zvětšeno 3000x)



Obrázek 27: Von – Misesovo napětí [MPa] voštinového jádra po zatížení posunutím
 (zobrazení deformací zvětšeno 10x)

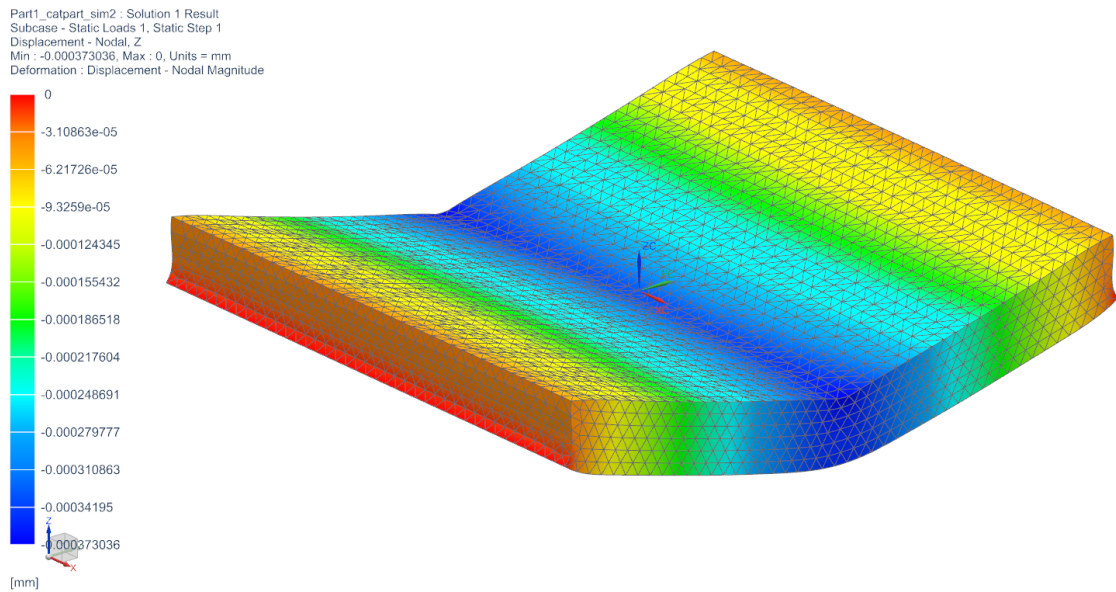


Obrázek 28: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnitřní vrstvy potahu po zatížení posunutím
 (zobrazení deformací zvětšeno 10x)

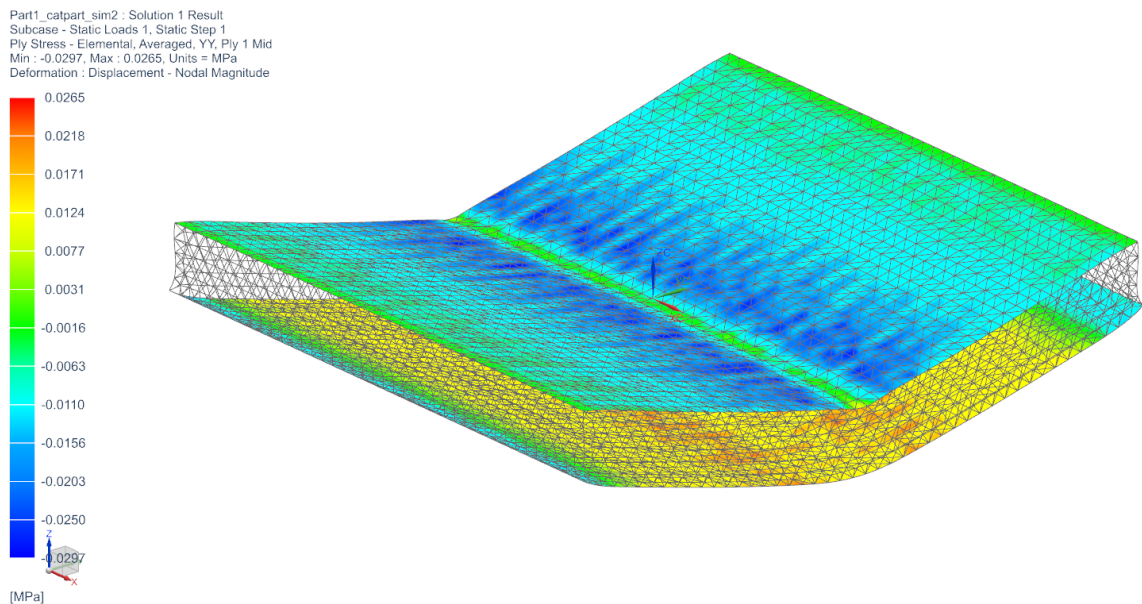


Obrázek 29: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnější vrstvy potahu po zatížení posunutím
(zobrazení deformací zvětšeno 10x)

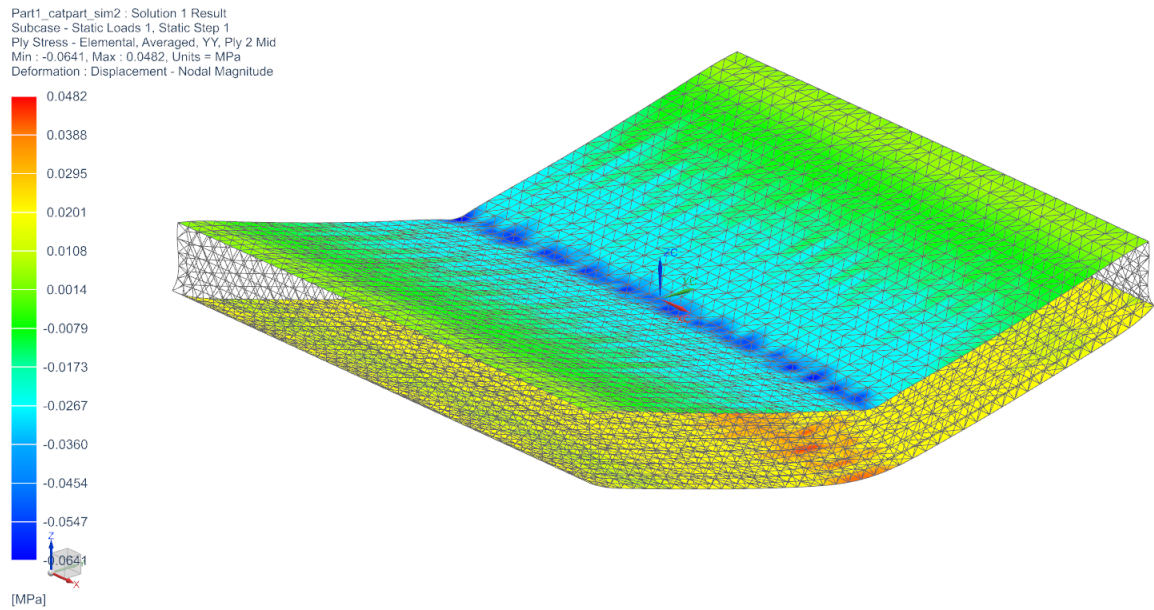
8.2 Model 3



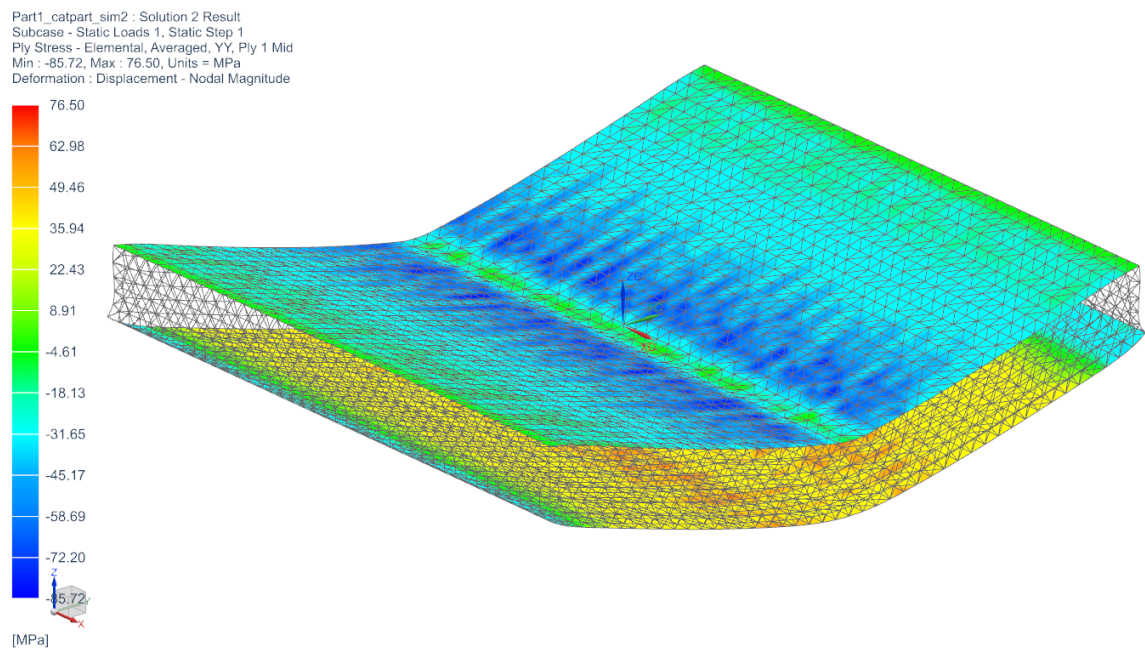
Obrázek 30: Posunutí [mm] Modelu 3 po zatížení silou
(zobrazení deformací zvětšeno 3000x)



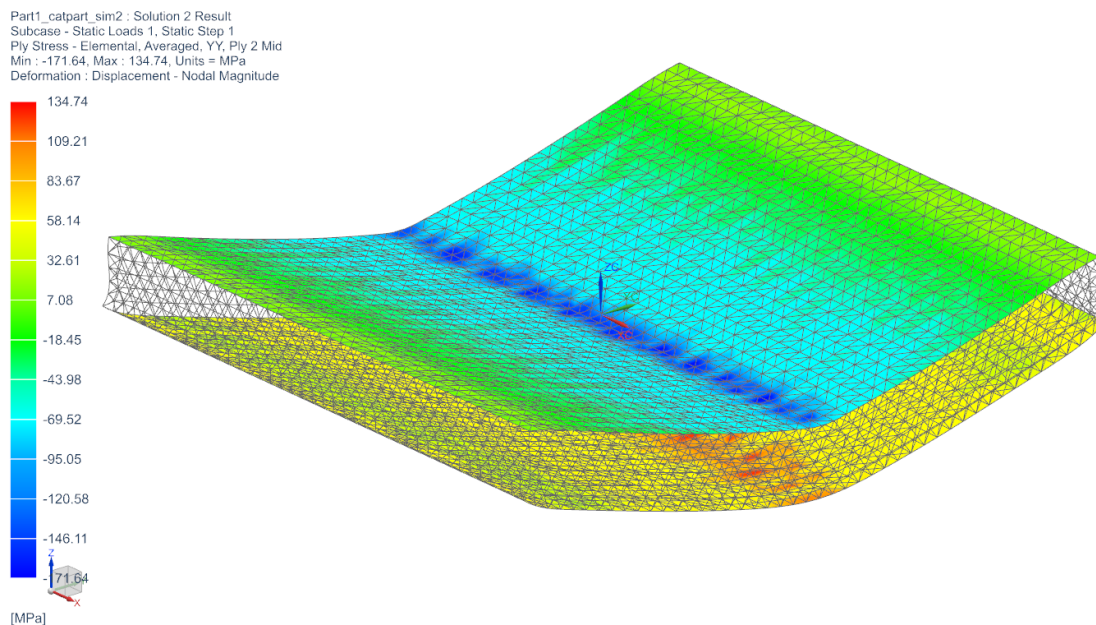
Obrázek 31: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnitřní vrstvy potahu po zatížení silou
(zobrazení deformací zvětšeno 3000x)



Obrázek 32: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnější vrstvy potahu po zatížení silou
 (zobrazení deformací zvětšeno 3000x)



Obrázek 33: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnitřní vrstvy potahu po zatížení posunutím
 (zobrazení deformací zvětšeno 10x)



Obrázek 34: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnější vrstvy potahu po zatížení posunutím
(zobrazení deformací zvětšeno 10x)

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Tabulka 3: Hodnoty maximálního napětí a posunutí pro Model 2 a Model 3 po zatížení silou

	Posunutí [mm]	Napětí horního potahu [MPa]		Napětí dolního potahu [MPa]	
		Vnější vrstva	Vnitřní vrstva	Vnější vrstva	Vnitřní vrstva
Model 2	0,0003949	-0,0730	-0,0301	0,0500	0,0262
Model 3	0,0003730	-0,0641	-0,0297	0,0482	0,0265
Procentuální rozdíl [%]	5,55	12,19	1,33	3,60	1,15

Tabulka 4: Hodnoty maximálního napětí pro Model 2 a Model 3 po zatížení posunutím

	Napětí horního potahu [Mpa]		Napětí dolního potahu [MPa]	
	Vnější vrstva	Vnitřní vrstva	Vnější vrstva	Vnitřní vrstva
Model 2	-162,15	-73,92	121,75	65,49
Model 3	-171,64	-85,72	134,71	76,50
Procentuální rozdíl [%]	5,85	15,96	10,64	16,81

Při zatížení Modelu 2 na ohyb silou o velikosti 1 N v záporném směru osy z, byla z FEM analýzy zjištěna maximální hodnota posunutí ve směru působící síly. Největší posunutí bylo zjištěno $3,949 \cdot 10^{-4}$ mm. Při zatížení Modelu 3 na ohyb silou o velikosti 1 N v záporném směru osy z, byla z FEM analýzy zjištěna maximální hodnota posunutí ve směru působící síly. Největší posunutí bylo zjištěno $3,730 \cdot 10^{-4}$ mm. Po porovnání posunutí obou modelů vychází procentuální rozdíl 5,5 %.

Při zatížení Modelu 2 na ohyb silou o velikosti 1 N v záporném směru osy z, byly z FEM analýzy zjištěny hodnoty Von – Misesova napětí. Celkem na čtyřech ze šesti ploch buňky voštinového jádra nabývalo Von – Misesovo napětí hodnot v intervalu od 0,2 do 0,3 MPa. Na zbylých dvou plochách buňky voštinového jádra byla hodnota Von – Misesova napětí 0 MPa.

Při zatížení Modelu 2 na ohyb posunutím o velikosti 1 mm v záporném směru osy z, byly z FEM analýzy zjištěny hodnoty Von – Misesova napětí. Celkem na čtyřech ze šesti ploch buňky voštinového jádra nabývalo Von – Misesovo napětí hodnot v intervalu od 500 do 700 MPa. Na zbylých dvou plochách buňky voštinového jádra byly hodnoty Von – Misesova napětí blízké 0 MPa.

Potah kompozitních dílů v případě Modelu 2 a Modelu 3 se vždy skládá ze dvou potahových vrstev. Vnější potahová vrstva se vždy nachází ve směru osy z dále od jádra než vnitřní potahová vrstva. Vnitřní potahová vrstva se naopak nachází ve směru osy z blíže sendvičovému jádru. Hodnoceno bylo normálové napětí potahových vrstev ve směru osy y .

Při zatížení Modelu 2 a Modelu 3 na ohyb silou o velikosti 1 N v záporném směru osy z , byly z FEM analýzy zjištěny hodnoty normálového napětí ve směru osy y pro horní potah a dolní potah. Z Tabulky 3 lze vyčíst, že napětí horního potahu nabývají záporných hodnot a napětí dolního potahu nabývají kladných hodnot. Toto tvrzení platí pro oba modely. Horní potah je tedy namáhán na tlak a dolní potah je namáhán na tah. Z hlediska napětí jsou nejvíce namáhány vnější vrstvy potahů. Při porovnání napětí jednotlivých vrstev potahů obou modelů zjistíme, že největšího rozdílu dosahují napětí ve vnější vrstvě horního potahu. Rozdíl napětí činí 12,19 %.

Při zatížení Modelu 2 a Modelu 3 na ohyb posunutím o velikosti 1 mm v záporném směru osy z , byly z FEM analýzy zjištěny hodnoty normálového napětí ve směru osy y pro horní potah a dolní potah. Z Tabulky 4 je opět patrné, že hodnoty napětí horních potahů nabývají záporných hodnot a hodnoty napětí dolních potahů se pohybují v kladných hodnotách. U obou modelů jsou největšímu napětí vystaveny vnější vrstvy. Rozdíly v hodnotách napětí jsou větší, než tomu tak bylo při zatížení silou o velikosti 1 N a pohybují se v řádech desítek procent. Největší rozdíl normálového napětí lze pozorovat u spodního potahu vnitřní vrstvy, kde se napětí Modelu 2 a Modelu 3 liší o 16,81 %.

ZÁVĚR

Teoretická část této bakalářské práce se zabývala popisem jednotlivých vrstev sendvičového kompozitu a popisem základních výrobních technologií kompozitních materiálů. V této části byla představena FEM metoda a popsána mechanika kompozitních materiálů.

Cílem praktické části bylo zkoumání modelování mechanických vlastností dílů z kompozitního sendvičového materiálu s voštinovým jádrem. Mezi sebou byly porovnávány dva modely – Model 2 a Model 3. Jádro Modelu 2 tvořila vymodelovaná voština z hliníku A356. Model 3 představoval zjednodušený model, kde bylo voštinové jádro nahrazeno plným blokem.

Samotná hliníková voština představovala Model 1. Tento model byl postupně zatěžován na tlak a smyk v jednotlivých osách tak, aby bylo možné vypočítat všechny materiálové konstanty. Po zatížení Modelu 1 bylo možné vypočítat šest materiálových konstant, které byly použity při definici nového ortotropního materiálu pro jádro Modelu 3.

Pro Model 2 a Model 3 byly nastaveny stejné okrajové podmínky. Oba sendvičové modely byly zatíženy silou o velikosti 1 N v záporném směru osy z . Nejprve bylo porovnáno posunutí ve směru zatížení obou modelů. Hodnoty maximálního posunutí ve směru působící síly byly pro oba modely téměř identické. U Modelu 2 bylo pozorováno Von – Misesovo napětí voštinového jádra. Z výsledků byly vyloučeny krajní hodnoty Von – Misesova napětí, které bylo možné pozorovat v místech uchycení tělesa. V místech, kde k sobě byly pevně slepeny plochy sousedních buněk voštiny, nevznikalo žádné napětí. Největší napětí se nacházelo ve zbylých čtyřech plochách buněk voštiny. U Modelu 3 nebylo Von – Misesovo napětí plného jádra sledováno. Geometrie jádra tohoto modelu neodpovídá skutečnosti, jelikož je v plném bloku obsaženo více materiálu. Jako poslední bylo porovnáváno napětí horního a dolního potahu obou modelů. Z výsledků FEM analýzy lze vyčíst, že napětí ve vrstvách horního potahu nabývá vždy záporných hodnot, tudíž je při ohybu horní potah namáhán na tlak. Hodnoty napětí vrstev spodního potahu se pohybují v kladných číslech, tudíž jsou namáhány na tah. Největšímu napětí byly vystaveny vnější vrstvy potahů.

Model 2 a Model 3 byly vystaveny zatížení posunutím horní plochy o velikosti 1 mm v záporném směru osy z . Výsledky napětí v jednotlivých vrstvách potahu byly přímo úměrné výsledkům napětí v potahových vrstvách při zatížení silou.

Z výsledků FEM analýzy lze říci, že Model 2 může být nahrazen Modelem 3 v případech, kdy je sledována deformace sendvičového materiálu, jelikož se hodnoty posunutí Modelu 2 a Modelu 3 téměř nelišily. Procentuální rozdíl 5,55 % je vzhledem k velikosti posunutí zanedbatelná. Drobná odchylka mohla být způsobena například větší velikostí elementů FEM sítě. Model 2 by nemohl být nahrazen v případech, kde je sledováno selhání materiálu. Selhání kompozitu je často způsobeno zborcením jádra, které Model 3 neumí řešit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 9788086960296.
- [2] NIU, Chunyun. Composite airframe structures: practical design information and data. 3rd ed. Hong Kong: Conmilit Press, 2010, 1 online zdroj (xxvi, 688 p.). Airframe book series. ISBN 9781613446560. Dostupné také z: <https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpCASPDID8>
- [3] The History of Sandwich Construction and Honeycombs. EconHP Holding [online]. Halle an der Saale [cit. 2020-10-12]. Dostupné z: <http://www.econhp.com/history/>
- [4] BITZER, Tom. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. London: Chapman & Hall, 1987, ix, 233 s. ISBN 0412540509.
- [5] ROCCA, Silvia a Antonio NANNI. Mechanical characterization of sandwich structure comprised of glass fiber reinforced core: Part 2. ResearchGate [online]. 2006, August 2005 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228701850_MECHANICAL_CHARACTERIZATION_OF_SANDWICH_STRUCTURE_COMPRISED_OF_GLASS_FIBER_REINFORCED_CORE_PART_2
- [6] CALLISTER, William D. a David G. RETHWISCH. Materials Science and Engineering: An Introduction. 9. Wiley, 2013. ISBN 1118324579.
- [7] ZENKERT, Dan. The Handbook of Sandwich Construction. 1997. ISBN 0947817964.
- [8] CAMPBELL, F.C. Structural Composite Materials. ASM International, 2010. ISBN 0-61503-037-9.
- [09] CLYNE, T.W. a D. HULL. An Introduction to Composite Materials. 3rd edition. Cambridge University Press, 2019. ISBN 9780521860956.
- [10] Guide to Composites. Gurit. [online]. © 2021 [cit. 2021-02-11]. Dostupný z: <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv5webpdf.pdf>

- [11] CHUNG, Deborah D. L. Composite Materials: Science and Applications. 2. vyd. London: Springer, 2010. Engineering Materials and Processes. ISBN n978-1-84882-830-8.
- [12] Prepregs. Composites One [online]. [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.compositesone.com/product/prepreg/>
- [13] What Are Prepregs? Fibre Glast [online]. [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center
- [14] Composite Materials Handbook: Volume 6. Structural Sandwich Composites. SAE International, 2013. ISBN 978-0-7680-8062-9.
- [15] HAN, Tong-Seok, Ani URAL, Chuin-Shan CHEN, Alan T. ZEHNDER, Anthony R. INGRAFFEA a Sarah L. BILLINGTON. International Journal of Fracture [online]. 115(2), 101-123 [cit. 2021-04-05]. ISSN 03769429. Dostupné z: doi:10.1023/A:1016333709040
- [16] AZMI, M A, H Z ABDULLAH a M I IDRIS. Properties of polyurethane foam/coconut coir fiber as a core material and as a sandwich composites component. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2013, 50 [cit. 2021-04-05]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/50/1/012067
- [17] ASM Handbook. Materials Park: ASM International, 2001. ISBN 0-87170-703-9.
- [18] UDUPI, Sathish Rao a Lewlyn LESTER RAJ RODRIGUES. Detecting Safety Zone Drill Process Parameters for Uncoated HSS Twist Drill in Machining GFRP Composites by Integrating Wear Rate and Wear Transition Mapping. Indian Journal of Materials Science [online]. 2016, 2016, 1-8 [cit. 2021-04-05]. ISSN 2314-7490. Dostupné z: doi:10.1155/2016/9380583
- [19] KUMAR, H.G. Prashantha a M. Anthony XAVIOR. Composite Materials Production for Automobile Applications. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering [online]. Elsevier, 2021, 2021 [cit. 2021-04-05]. ISBN 9780128035818. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.11894-6
- [20] NAWAZ, Ahmad, Bilal ISLAM, M. Sadiq KHATTAK, Liaquat ALI, Umar SALEEM, Azmat ULLAH, M. Zafar IJAZ a Weiguo MAO. Polyester Usage in Manufacturing of Electrical and Mechanical Products and Assemblies.

- CAMLIBEL, Nurhan Onar, ed. Polyester - Production, Characterization and Innovative Applications [online]. InTech, 2018, 2018-03-14 [cit. 2021-04-05]. ISBN 978-953-51-3881-5. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.74368
- [21] GALLEGOS C., Marco F. Theoretical and Experimental Performance Analysis of a Cellular GFRP Vehicular Bridge Deck. ResearchGate [online]. [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.1737.6887
- [22] BOWER, Allan F. Applied mechanics of solids. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4398-0247-2
- [23] OKEREKE, Michael a Simeon KEATES. Finite Element Applications: A Practical Guide to the FEM Process. Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-67125-3.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
C	Tuhost
d	Průměr [mm]
E	Modul pružnosti v tahu nebo tlaku [MPa]
F	Síla [N]
G	Modul pružnosti ve smyku [MPa]
PVC	Polyvinylchlorid
S	Poddajnost
SAN	Styren-akrylonitril
UV	Ultrafialové
σ	Napětí [Pa]
ε	Relativní prodloužení [-]
ν	Poissonovo číslo [-]
τ	Smykové napětí [Pa]
γ	Úhel zkosení [°]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma sendvičového panelu s voštinovým jádrem [6]	12
Obrázek 2: Základní rozdělení vláknových kompozitů [6]	14
Obrázek 3: Kompozit s voštinovým jádrem [15].....	20
Obrázek 4: Typy voštinových jader [14]	20
Obrázek 5: Kompozit s pěnovým jádrem [16].....	22
Obrázek 6: Technologie ručního laminování [18]	26
Obrázek 7: Technologie RTM [20]	28
Obrázek 8: Technologie pultruze [21]	29
Obrázek 9: Vizualizace deformovaného tělesa [22]	30
Obrázek 10: Základní typy 2D a 3D prvků [22]	32
Obrázek 11: Postup tvorby voštinového jádra	39
Obrázek 12: Model voštinového jádra.....	40
Obrázek 13: Detail FEM sítě voštinového jádra.....	41
Obrázek 14: Okrajové podmínky pro Řešení 2	42
Obrázek 15: Okrajové podmínky pro Řešení 3	43
Obrázek 16: Okrajové podmínky pro Řešení 4	44
Obrázek 17: Okrajové podmínky pro Řešení 6	45
Obrázek 18: Silové zatížení Modelu 2.....	47
Obrázek 19: Zatížení posunutím Modelu 2	48
Obrázek 20: Materiálové konstanty ortotropního jádra Modelu 3	49
Obrázek 21: Silové zatížení Modelu 3.....	50
Obrázek 22: Zatížení posunutím Modelu 3	50
Obrázek 23: Posunutí [mm] Modelu 2 v ose z po zatížení silou	51
Obrázek 24: Von – Misesovo napětí [MPa] voštinového jádra po zatížení silou.....	51
Obrázek 25: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnitřní vrstvy potahu po zatížení silou.....	52
Obrázek 26: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnější vrstvy potahu po zatížení silou.....	52
Obrázek 27: Von – Misesovo napětí [MPa] voštinového jádra po zatížení posunutím	53
Obrázek 28: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnitřní vrstvy potahu po zatížení posunutím.....	53
Obrázek 29: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnější vrstvy potahu po zatížení posunutím.....	54
Obrázek 30: Posunutí [mm] Modelu 3 po zatížení silou	55

Obrázek 31: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnitřní vrstvy potahu po zatížení silou.....	55
Obrázek 32: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnější vrstvy potahu po zatížení silou.....	56
Obrázek 33: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnitřní vrstvy potahu po zatížení posunutím.....	56
Obrázek 34: Normálové napětí [MPa] ve směru osy y vnější vrstvy potahu po zatížení posunutím.....	57

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Materiálové konstanty – část 1.....	46
Tabulka 2: Materiálové konstanty – část 2.....	46
Tabulka 3: Hodnoty maximálního napětí a posunutí pro Model 2 a Model 3 po zatížení silou.....	58
Tabulka 4: Hodnoty maximálního napětí pro Model 2 a Model 3 po zatížení posunutím ..	58

