



**FAKULTA
APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

Katedra mechaniky

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
STATICKÁ PEVNOST LOPATKY OSOVÉHO
VENTILÁTORU PRO ZTÍŽENÉ PROVOZNÍ
PODMÍNKY**

Lukáš Horák

Vedoucí práce: Ing. Jan Krystek Ph.D.

Plzeň 2022

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně na základě konzultací s vedoucím práce Ing. Janem Krystekem Ph.D. a s použitím literatury a pramenů uvedených v této práci.

V Plzni, 31. května 2022

Lukáš Horák

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Janu Krystkovi Ph.D., za příkladné vedení a za čas který mi věnoval během celého studia a za všechny cenné rady, které jsem dostal při psaní této práce. Dále bych také rád poděkoval všem dalším, kteří mi pomohli při vypracování této práce.

A v neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za neustálou podporu při celém studiu.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vyšetřením statické pevnosti kompozitové lopatky axiálního ventilátoru za ztížených provozních podmínek. První numerické simulace byly laděny na modelu kořenu lopatky a poté na samotné lopatce, oba modely byly v práci detailně popsány. Dále bylo v experimentální části práce provedeno množství experimentálních zkoušek pro přesnější naladění numerického modelu. Jmenovitě modální analýza, statická ohybová zkouška, statická tahová zkouška a jiné pomocné experimenty.

Abstract

This diploma thesis deals with examination of the static strength of the composite blade of an axial fan under difficult operating conditions. The first numerical simulations were tuned on the blade root model and then on the blade itself, both models were described in detail in the work. Furthermore, a number of experimental tests were performed in the experimental part of the work for a more precise tuning of the numerical model. Namely modal analysis, static bending test, static tensile test and other auxiliary experiments.

Obsah

1	Úvod	1
2	Ventilátory	3
2.1	Rozdělení ventilátoru	3
2.2	Základní části ventilátoru	4
2.3	Lopatky	5
2.4	Experimentální vyšetření pevnosti	6
3	Odolné materiály v lopatkových strojích	7
3.1	Odolné materiály na bázi kovu	7
3.2	Odolné materiály v kompozitech	8
3.2.1	Geopolymerní matrice	8
3.2.2	Fenolické pryskyřice	9
3.3	Dodatečné zvýšení odolnosti	9
3.4	Experimentální vyšetření	10
4	Lopatka popis	11
5	Experimenty	14
5.1	Experiment tahové zkoušky dvoukořenu	14
5.2	Statická tahová zkouška lopatky	16
5.2.1	Výsledky tahové zkoušky	17
5.3	Dlouhodobá zkouška v agresivním prostředí	20
5.4	Modální analýza–experiment	20
5.5	Ohybová zkouška–experiment	23
5.6	Pomocné experimenty lopatky	23
6	Numerické simulace	26
6.1	Dvoukořen	26
6.1.1	Dvoukořen výsledky	31
6.2	Lopatka	32
6.2.1	Ohybová zkouška lopatky	35
6.2.2	Tahová zkouška lopatky	37
6.2.3	Modální analýza lopatky	37
7	Závěr	42

Seznam obrázků

Obr. 1	Rozdělení ventilátoru podle průchodu vzdušiny	3
Obr. 2	Schéma axiálního ventilátoru [34]	4
Obr. 3	Geometrický popis lopatky [22]	5
Obr. 4	Zkušební odstředivý rotor [31]	6
Obr. 5	Porovnání geometrie původní (a) a navržené kompozitové lopatky (b)	13
Obr. 6	Geometrický model dvoukořenu s podpěrným kroužkem	14
Obr. 7	Porušená sada vzorků dvoukořenu s podpěrným ocelovým kroužkem [26]	15
Obr. 8	Zavěšená lopatka v licí formě (a), zavěšená lopatka (b)	17
Obr. 9	Schéma statické zkoušky [20] (a), reálná sestava před zkouškou lopatky č.2 (b).	18
Obr. 10	Závislost síla–prodloužení pro tahovou zkoušku lopatek.	19
Obr. 11	Porušení lopatky č. 2 při dalším zatížení až do úplné destrukce. [15].	20
Obr. 12	Lopatka namontovaná v agresivním prostředí [31].	21
Obr. 13	Sestava experimentální ohybové zkoušky lopatky	24
Obr. 14	Výsledky z ohybové zkoušky lopatky	25
Obr. 15	Rozdělená lopatka	25
Obr. 16	Výpis částí dvoukořenu v řezu	27
Obr. 17	Výpočetní síť dvoukořenu	28
Obr. 18	Orientace kompozitu dvoukořenu (a), detail vrstvení kompozitu (b)	29
Obr. 19	Okrajové podmínky dvoukořenu se zatížením pomocí náboje	30
Obr. 20	Porovnání kritického místa v numerické simulaci (a) a experimentu (b)	31
Obr. 21	Výsledné napětí pro jádro v konfiguraci skořepina kontaktní úlohy	32
Obr. 22	Výpočetní síť lopatky	33
Obr. 23	Rozdělení lopatky podle počtu vrstev a přelepů	34
Obr. 24	Model ohybové zkoušky	35
Obr. 25	Porovnání experimentálních výsledků ohybové zkoušky s numerickými	36
Obr. 26	Rozdělení tělesa na tuhé (šedá) a deformovatelné těleso (zelená)	37
Obr. 27	Porovnání kritického místa numerické a experimentální tahové zkoušky lopatky	38

Seznam tabulek

Tab. 2	Porovnání mechanických vlastností vybraných materiálů	9
Tab. 3	Použité díly statické zkoušky [20]	17
Tab. 4	Hodnoty vlastních frekvencí volných lopatek	22
Tab. 5	Hodnoty vlastních frekvencí upnutých lopatek	22
Tab. 6	Materiálové parametry změřených materiálů	26
Tab. 7	Porovnání kombinací zatížení a typ prvků pro napětí a posunutí ve směru x a y	33
Tab. 8	Statické materiálové parametry laminy	36
Tab. 9	Statické materiálové parametry izotropních materiálů	36
Tab. 10	Omezení a počáteční hodnoty optimalizačních parametrů	39
Tab. 11	Dynamické materiálové parametry laminy	40
Tab. 12	Dynamické materiálové parametry izotropních materiálů	40
Tab. 13	Hodnoty vlastních frekvencí volných lopatek	40
Tab. 14	Hodnoty vlastních frekvencí vetknutých lopatek	41

Seznam označení

Označení	Popis	Jednotky
CAD	Computer-Aided Drafting - počítačem podporované kreslení	
CAE	Computer Aires Engineering – počítačem podporované inženýrství zahrnující mj. metodu konečných prvků	
E	Youngův modul (izotropní materiál)	[GPa]
E_{11}	Youngův modul v hlavním směru	[GPa]
E_{22}	Youngův modul v sekundárním směru	[GPa]
E_{33}	Youngův modul v terciálním směru	[GPa]
E_{comp}	Youngův modul pro kompozit	[GPa]
E_{gren}	Youngův modul pro jádro	[GPa]
F	síla	[N]
f	koeficient tření	[-]
F_b	zátěžná síla při ohybové zkoušce lopatky	[N]
F_d	zátěžná síla při tahové zkoušce dvoukořenu	[N]
F_{max}	maximální dosažená hodnota síly při tahové zkoušce lopatky	[N]
F_o	odstředivá síla	[N]
F_t	síla při prvním porušení lopatky	[N]
G_{12}	smykový modul v rovině 12	[GPa]
G_{13}	smykový modul v rovině 13	[GPa]
G_{23}	smykový modul v rovině 23	[GPa]
h	průměrná tloušťka kompozitní vrstvy	[mm]
\overline{h}_j	průměrná tloušťka kompozitní vrstvy v místě bez přelepů	[mm]
\overline{h}_{pr}	průměrná tloušťka kompozitní vrstvy v místě přelepů	[mm]
h_v	základní velikost elementu	[mm]
k_s	koeficient bezpečnosti vůči odstředivé síle	[-]
m_h	hmotnost hliníkové lopatky	[kg]
MKP	Metoda Konečných Prvků	
m_r	hmotnost lopatky nad požadovaným řezem r	[kg]
m_s	hmotnost kompozitové lopatky	[kg]
n	provozní otáčky ventilátoru	[ot.min ⁻¹]
r	vzdálenost od vetknutí ke středu hmotnosti sledovaného řezu	[m]

Označení	Popis	Jednotky
S	značení napětí v prostředí Abaqus	[Pa]
S_{11}	složka napětí v hlaním směru kompozitu	[Pa]
S_{22}	složka napětí v sekundárním směru kompozitu	[Pa]
T	teplota	[°C]
t	čas	[s]
U	posunutí	[mm]
U_1	složka posunutí ve směru x	[mm]
U_2	složka posunutí ve směru y	[mm]
v	rychlost zatěžování (posuv příčnicku)	[mm.s ⁻¹]
NTIS	Nové technologie pro informační společnost	
Δl_0	Prodloužení zalité lopatky	[mm]
ν	Poissonova konstanta (izotropní materiál)	[-]
ν_{12}	Poissonova konstanta v rovině 12	[-]
ν_{13}	Poissonova konstanta v rovině 13	[-]
ν_{23}	Poissonova konstanta v rovině 23	[-]
ω	úhlová rychlost lopatky	[rad.s ⁻¹]
ϕ	úhlová dráha	[rad]
ρ	hustota materiálu	[kg.m ⁻³]

1 Úvod

Ventilátory jsou používány v celé řadě různých odvětví průmyslu a domácnostech. Použití ventilátorů v průmyslu lze nalézt například v uhelných elektrárnách, větrání v tunelech, továrních halách atd. V domácnostech se setkáváme s klimatizačními jednotkami, ventilátory a dalšími. Primárním účelem ventilátoru je doprava vzdušiny. V poslední době v rámci energetických a finančních úspor je stále více vyžadován dokonalejší návrh a provedení. Tímto se dosahuje finančně výhodnějšího a provozně efektivnějšího životního cyklu. Ventilátor se skládá z mnoha dílčích částí, které je možno stále zdokonalovat. [9] V rámci této práce se zaměřujeme na úpravu lopatek.

Inovace lopatek je možná mnoha způsoby, mezi nejčastější patří změna aerodynamického návrhu nebo obměna materiálů. Správný aerodynamický návrh může zlepšit hlučnost a účinnost celé konstrukce. Pro změnu materiálu se v poslední době využívají různé kompozity, které nabízí širokou škálu vlastností se skvělými mechanickými charakteristikami a nízkou hustotou. Jako příklad lze uvést uhlíkové a sklolaminátové lopatky, které jsou s úspěchem využívány v rámci stabilních prostředí. Použití sklolaminátové lopatky lze nalézt například ve větrné elektrárně. [12] Zaměření této práce bylo na materiálový charakter kompozitní lopatky.

Před každým návrhem je nutné definovat síly, vlivy a omezující podmínky. Tradičně se jedná o podmínky geometrické a finanční. Agresivní prostředí, zvýšená teplota a vlhkost jsou některé z vlivů, které stěžují návrh. Omezení, které nás v této práci nejvíce zajímá je odolnost k agresivnímu prostředí. Ta z velké části ztěžuje použití kompozitních materiálů. V době psaní této práce se jako materiál pro lopatky v agresivním prostředí používá z větší části hliník nebo jiné slitiny. Tyto slitiny jsou odolné, ale vůči kompozitu jsou těžší. Tento faktor se projevuje v návrhu zbytku komponent ventilátoru, které musí být robustně nadimenzovány. Větší hustota materiálu se negativně projeví na maximální úhlové rychlosti. [10]

Díky neustálému materiálovému vývoji je možné využít nové materiály, které dokáží odolávat agresivnímu prostředí a využít výhod kompozitních materiálů.

Samotná lopatka je namáhána kombinací tahu, krutu a ohybu. Nejvýznamnější účinek má tahové zatížení, které vzniká odstředivou silou. Toto namáhání můžeme pro potřebu navrhování a testování nahradit osovou statickou silou. Cílem diplomové práce bylo provést statickou zkoušku kompozitní lopatky axiálního ventilátoru, která by ověřila pevnost lopatky pro ztížené provozní podmínky. Diplomová práce je věnována metodice a návrhu experimentální zkoušky a vytvoření numerického modelu.

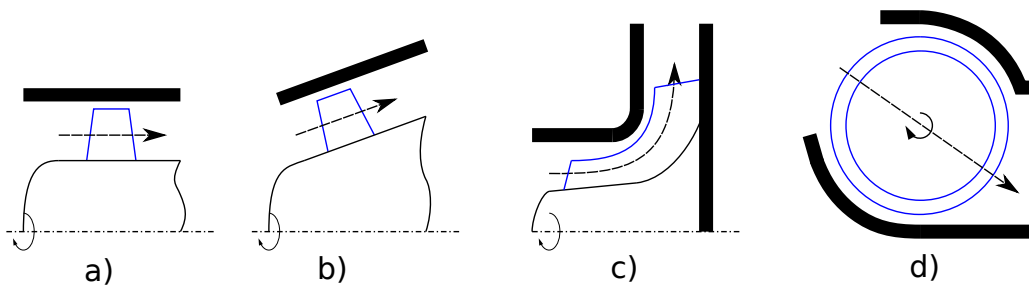
V následující druhé kapitole je uvedena řešební část pro ventilátory se zaměřením na lopatky a experimentální ověření pevnosti. Na toto navazuje třetí kapitola, která se zabývá odolnými materiály v lopatkových strojích, kde jsou uvedeny vybrané kovové a kompozitní materiály, které byly relevantní pro tuto práci. Čtvrtá kapitola uvádí konkrétní řešenou problematiku v rámci projektu a popisuje samotnou lopatku a její náležitosti k řešení. Pátá kapitola se zaměřuje na popis celé řady experimentů, které sloužily jak ke zjištění různých vlastností lopatky (např. modální vlastnosti, ohybová tuhost, tahová pevnost apod.), tak i k validaci numerických simulací. Těmto simulacím se podrobně věnuje šestá kapitola. V poslední (sedmé) kapitole je uveden závěr, kde jsou diskutovány dosažené výsledky.

2 Ventilátory

Ventilátor je rotační lopatkový stroj, který se používá ke kontinuální dopravě plynů a par při malém rozdílu tlaku na vstupu a výstupu. Pro přesnější zařazení je možné použít veličinu kompresního poměru definovanou jako poměr celkového objemu a objemu komprese. Hodnota tohoto poměru pro jednostupňové ventilátory se pohybuje od 1,01 až 1,1 a u vícestupňových se poměr může dostat až k hodnotě 1,5. U větších hodnot by se jednalo o dmychadla a kompresory, které slouží spíše pro stlačování plynu. [9]

2.1 Rozdělení ventilátoru

Ventilátory je možné rozdělit podle mnoha kritérií. Hlavní hledisko je směr průtoku vzdušiny oběžným kolem. Podle tohoto hlediska je možné ventilátory rozdělit na: axiální, diagonální, radiální a diametrální. Graficky je rozdělení uvedeno na obr. 1.



Obrázek 1: Rozdělení ventilátoru podle průchodu vzdušiny

- a) **Axiální ventilátor** má rychlost vzdušiny na vstupu i výstupu rovnoběžnou s osou rotace. Tento typ se používá při dopravě velkého objemu vzduchu s nízkým kompresním poměrem.
- b) **Diagonální ventilátor** má rychlost vzdušiny na vstupu rovnoběžnou s osou rotace a na výstupu skloněnou k ose rotace oběžného kola.
- c) **Radiální ventilátory** mají rychlost vzdušiny na vstupu rovnoběžnou s osou rotace a na výstupu je rychlost kolmá k ose rotace.
- d) **Diametrální ventilátor** má rychlost vzdušiny na vstupu i výstupu přibližně kolmou k ose rotace. Vzdušina prochází oběžným kolem ve směru průměru.

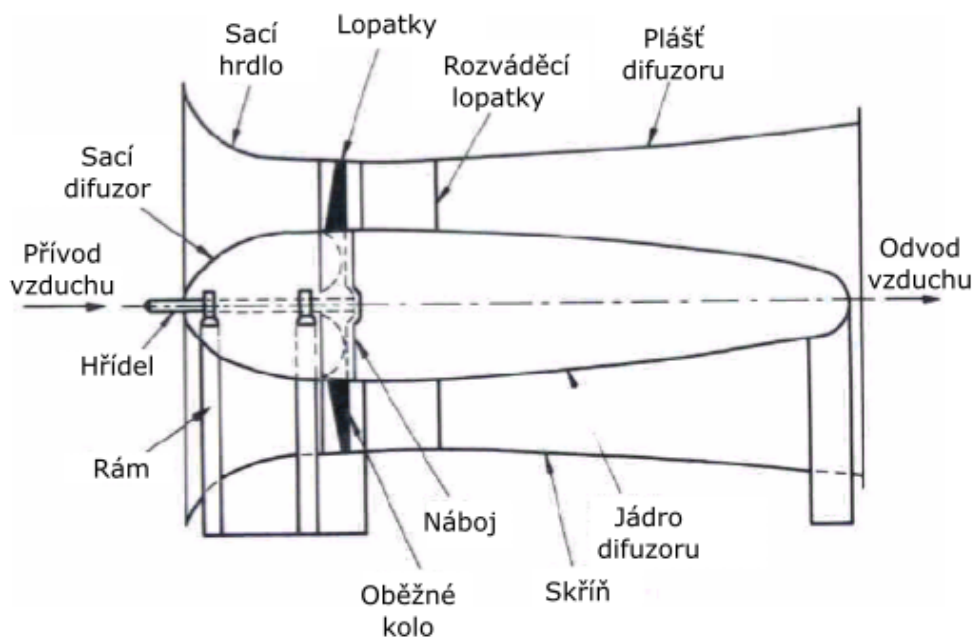
Další důležité rozdělení hlavně pro uživatelskou oblast je podle maximálně dosažitelného celkového tlaku ventilátoru, kde nízkotlaké ventilátory jsou s hodnotou celkového tlaku nižší než 1000 Pa. Středotlaké ventilátory v rozmezí tlaku 1000–3500 Pa a vysokotlaké s tlakem vyšším než 3500 Pa.

Ventilátory je možné dále rozdělovat podle počtu stupňů na jednostupňové a více stupňové. Ventilátory více stupňové jsou tvořeny soustavou jednostupňových. Stupeň ventilátoru se skládá z oběžného kola, náboje s rotorovými lopatkami a párem statorových lopatek na statoru. [9]

Dále lze ventilátory rozdělit dle druhu pohonu, způsobu spojení rotoru s pohonem, polohy osy a v závislosti na odvětví a aplikaci mnoho dalších.

2.2 Základní části ventilátoru

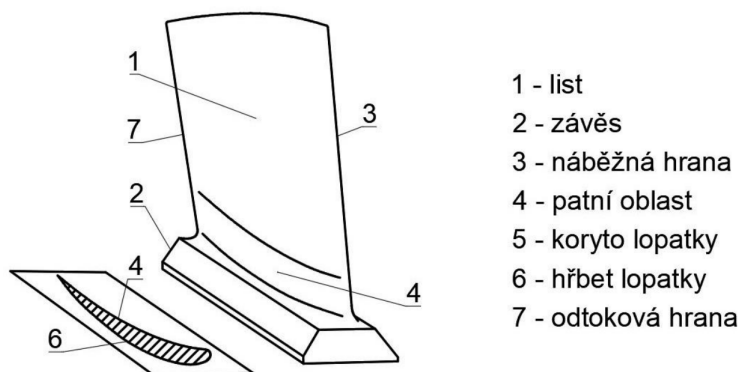
Obecně se ventilátor skládá z rotoru, skříně, základového rámu a pohonu. Na obr. 2 je schéma axiálního ventilátoru, kde jsou vyznačeny jeho hlavní části. Rotor lze dále rozdělit na oběžné kolo, hřídele a řemenice. Oběžné kolo se skládá z nosného kotouče a lopatek.



Obrázek 2: Schéma axiálního ventilátoru [34]

2.3 Lopatky

Lopatka je hlavní částí rotoru, která je v přímém kontaktu se vzdušinou. Lopatka funguje jako médium, které transformuje energii rotoru na kinetickou energii vzdušiny. Geometrický popis lopatky je uveden na obr. 3, kde jsou



Obrázek 3: Geometrický popis lopatky [22]

vidět tři hlavní části lopatky. Jmenovitě: list (1), pata lopatky (4) a závěs (2). [22]

List lopatky může být přímý nebo zkroucený. Přímé listy se většinou používají, pokud délkový rozměr listu je znatelně menší než poloměr oběžného kola. V opačném případě se používají listy zkroucené, které jsou zkroucené po své délce. Patní část lopatky má větší úhel náběhu a konec listu má nižší úhel náběhu. Správně navržený list bude mít přibližně rovnoměrné reakční účinky vzhledem k úhlové rychlosti.

Závěs (kořen) lopatky slouží k přenášení silových účinků působících na lopatku do náboje a rotoru. Okolí kořene je obecně nejkritičtější místo lopatky, jak z hlediska statického zatížení, tak z únavy materiálu. Důvodem je složitá geometrie, kde vzniká velká koncentrace napětí.

Lopatky ventilátorů a obecně lopatkových strojů jsou namáhány kombinací tahu, ohybu a krutu. Tahové zatížení vzniká z důvodu odstředivé síly. Odstředivá síla společně s tlakem plynu působící na list má za následek ohybové zatížení. Stejná kombinace sil má za následek i kroutící zatížení. Nejvýznamnější účinek má tahové zatížení. [10]

Z tohoto důvodu je tahová statická zkouška nutná k posouzení vhodnosti návrhu.

2.4 Experimentální vyšetření pevnosti

Pro experimentální vyšetření lopatek máme několik možností. Obecně můžeme experimenty rozdělit na experimenty statické a dynamické. Mezi statické zkoušky může být zmíněna statická tahová zkouška, která primárně ověřuje pevnost v kořeni lopatky nebo v jiném sledovaném řezu. Statická ohybová zkouška, která ověřuje ohybovou tuhost lopatky a působení ohybového napětí v kořeni.

Základem dynamických zkoušek je modální analýza. Výsledkem analýzy jsou vlastní frekvence a vlastní tvary, které jsou nutnou součástí návrhu jakéhokoliv rotačního stroje. Další dynamickou zkouškou před vlastním nasazením do provozu může být experiment ve zkušebním rotoru. Jedná se o formu trhacího stroje, kde se roztočením lopatky vyvodí odstředivá síla v uzavřeném bubnu. Z důvodu vysokých odstředivých sil se jedná primárně o dlouhodobé zkoušky únosnosti. Zkušební stroj tohoto typu je vidět na obr. 4. [30]



Obrázek 4: Zkušební odstředivý rotor [31]

3 Odolné materiály v lopatkových strojích

Agresivní prostředí má degradační vlastnosti na materiál jemu vystavený. Z tohoto důvodu je nutné navrhovat a používat materiály, které si dokáží zachovat provozní vlastnosti po dobu své navrhované životnosti. Příklady agresivního prostředí jsou například zvýšená teplota, tlak, chemicky agresivní prostředí a prostředí se zvýšeným obsahem abrazivních částic. S tímto prostředím se lze setkat například ve ventilačních šachtách uhelných elektráren, požárních přepážkách, vzduchovodech, apod. Každé z těchto prostředí má své specifické účinky na různé materiály. Dále jsou v textu uvedeny účinky na kovy a kompozity z důvodu velkého zastoupení těchto materiálů v běžné praxi. Z důvodu široké škály vlastností kompozitů a kovů jsou v dalším příkladu brány běžné materiály bez dodatečných úprav. Například ocel a uhlíkový kompozit s epoxidovou maticí.

Vyšší teplota v případě kovů snižuje maximální únosnost konstrukce, dochází k výraznému tečení materiálu a zvyšuje se náchylnost kovu ke korozi. Zde se bavíme o širokém rozmezí teplot. Pro kompozity by docházelo ke ztrátě pevnosti z důvodu tečení matrice a dále ztráty koheze mezi maticí a výtuzí.

Zvýšený tlak a oděr lze nalézt například v potrubí, kde může docházet k oděru vrchní vrstvy kovů a v případě kompozitů k delaminaci.

Chemicky agresivní prostředí, může být například slaná voda (alkalický roztok) a kyseliny. Takové prostředí bude mít korozivní, degradační účinek na většinu materiálů.

V případě mnoha odvětví se jedná o kombinace výše zmíněných prostředí, kde ventilátory obvykle obsahují množství různých druhů materiálu, které musí prostředí odolat.

3.1 Odolné materiály na bázi kovu

Kovy jsou velice dostupné materiály se širokou škálou vlastností, které je dále možné modifikovat pomocí různých přísad a úprav. Kovy disponují dobrou odolností v různém spektru teplot. Jejich nevýhodou je vysoká hustota a nízká odolnost proti agresivnímu prostředí.

Ve vysoké míře používaným materiálem pro výrobu lopatek a většiny částí ventilátoru je hliník. Jeho dobrá tvárnost mu umožňuje použití i pro složitější tvary jako jsou právě lopatky. Hliník je odolný korozi a má nízkou hustotu. Jeho nevýhoda je nízká odolnost v chemicky agresivním prostředí. Tento problém částečně kompenzují různé příměsi a nátěry, která jsou pro použití méně finančně výhodné.

Slitiny mědi jsou již méně používaný materiál, který se používal hlavně pro vedlejší části ventilátoru a v určitých případech pro lopatky. Materiál

má vysokou hustotu a nízkou pevnost. Slitina mědi–bronz má velmi dobrou odolnost proti chemickému prostředí, jako je mořská voda. [10]

Běžnou ocel lze nalézt spíše v konstrukčních částech, kde vysoká hustota nemá příliš velký účinek v rámci dynamických dějů. Ocel najdeme v mnoha provedeních s různou škálou vlastností. Nejběžnější je uhlíková ocel, která je vhodná při provozu do 250°C z důvodu stárnutí při vyšších teplotách. Dalším typem může být slitinová ocel, která je ušlechtlejší. Pro případy extrémního prostředí lze uvést vysokopevnostní korozivzdorné oceli, které se používají například pro dlouhé lopatky. [28]

3.2 Odolné materiály v kompozitech

Odolnost kompozitového materiálu závisí na jeho složkách. Jmenovitě na nosné výztuži a matici, která je krycí částí a chrání nosnou výztuž od vnějších vlivů. Nosná výztuž ve většině případů by neměla mít vliv na odolnost kompozitu vůči vnějšímu prostředí, ale nesmí degradovat v prostředí matrice. Matrice se zvýšenou odolností proti agresivnímu prostředí je aktuálním tématem mnoha prací. [4] [21] [5] Dále jsou v textu uvedeny některé příklady odolných matic, které byly relevantní k této práci.

3.2.1 Geopolymerní matrice

Jako první příklad uvedeme geopolymerní matici. Geopolymer je anorganický polymerní materiál připravovaný hlinito-křemičitany tvořící dlouhodobě kovalentní vazby. Vazby $Si - O - Al - O$ vznikají za normální teploty a tlaku. Matrice má dobré mechanické vlastnosti do vysokých teplot, která se uvádí v některých případech až do 1200°C [5]. Tato odolnost je dosažena bez dodatečných tepelných úprav jako je žíhání nebo slinování. Zároveň má vysokou chemickou odolnost jak v alkalickém, tak i kyselém prostředí. Tato skutečnost plyne z výroby, kde geopolymer je silně alkalický. V případě hoření je výhodou nízká kouřotvornost a netoxické zplodiny. Při výrobě nevznikají těkavé ani toxické látky a tudíž není potřeba dedikované pracoviště s trvalým odsáváním a čištěním vzduchu.

Porovnání mechanických vlastností geopolymerního kompozitu s výčtem vybraných materiálů je uvedeno v tab. 2. [4] [21]

V článku [21] je uvedena experimentální závislost efektivního modulu na vystavené teplotě před zkouškou některých geopolymerních matic.

Tabulka 2: Porovnání mechanických vlastností vybraných materiálů

Materiál	Pevnost v tahu 22 °C [MPa]	Pevnost v tahu 600 °C [MPa]	Objemová hmotnost [kg· m ⁻³]
Epoxid/uhlík	540	0	1700
Běžný dural	350	0	2800
Geopolymer/uhlík	260	150	1600

3.2.2 Fenolické pryskyřice

Druhý příklad odolných matric jsou fenolické pryskyřice, které jsou reaktivní a vyrábějí se kondenzací fenolů a vodných roztoků aldehydů. Pomocí různých modifikací ve formě přidání aditiv a stavbou makromolekul lze v určité míře měnit a vylepšovat vlastnosti. Například zvýšením hustoty sítě makromolekul je dosaženo větší odolnosti proti vysokým teplotám, změnou pH lze prodloužit dobu zpracovatelnosti, atd... Jsou vysoce tepelně a chemicky odolné. Při výrobě dochází k uvolňování zplodin a práce stěžují použité kyseliny. To je jedním z důvodů, proč jsou méně finančně dostupné než již zmíněné geopolymer.

Při vytvrzování fenolických pryskyřic dochází k třem reakčním stavům:

1. Podle poměru fenolu/formaldehydu dostáváme výchozí lineární stav rezolu nebo novovlak. Jedná se o kapalný, tavitelný a rozpustný stav.
2. Druhá fáze (mezifáze) není jednoznačně definovaná, nazývá se rezitol. Jedná se o tavitelný, formovatelný nerozpustný bobtnající stav.
3. Konečný stav finálního rezitu. Netavitelný, nerozpustný s vysokou mechanickou pevností a chemickou odolností.

Bez různých kombinací materiálu například s epoxidem jsou fenolické pryskyřice křehké. Z tohoto důvodu se nehodí na aplikace s větší jednolitou plochou. [3]

3.3 Dodatečné zvýšení odolnosti

Méně odolné materiály lze dodatečně upravovat pro splnění požadované odolnosti. Zde se nabízí různé nátěry, které vytváří pouze povrchovou vrstvu,

která podle potřeby může být žáruvzdorná, odolná proti chemicky agresivnímu prostředí, povětrnostním vlivům, apod. Aplikace nátěrů může být omezena vrchní vrstvou, kde nemusí docházet k dobré adhezi nátěru s povrchem.

Podle použitého materiálu se dále dá uplatnit žíhání, slinování.

3.4 Experimentální vyšetření

Pro ověření vlastností v požadovaném prostředí musí být materiály podrobeny zkouškám ve ztížených podmínkách. Ideální ověření je přímo v navrhovaném prostředí. To z mnoha důvodů nemusí být vždy možné. Velkým omezením může být například bezpečnost nebo časová náročnost. K tomuto účelu jsou navrženy zkušební přístroje, které simulují prostředí v kontrolním místě technického pracoviště. Příkladem mohou být klimatické komory, které simulují požadovanou teplotu a vlhkost. V určitých případech může být proces zkoušky upraven k úspoře času.

4 Lopatka popis

Zadání diplomové práce je vázáno na řešení projektu FW01010153 „Odlehčená lopatka osového ventilátoru pro ztížené provozní podmínky“, který byl vybrán Technologickou agenturou České republiky (poskytovatelem) k podpoře ve výzvě 1. veřejná soutěž Programu TREND, Podprogram 1 "Technologičtí lídři".

V prvotních fázích první etapy bylo rozhodnuto o možných aplikacích lopatky pro ztížené podmínky. První aplikací jsou lopatky pro ventilátory na odtah spalin z kotle. Jedná se o prostředí se stálou vyšší teplotou a vyšším obsahem abrazivních příměsí. Teplota podle fáze zatížení se pohybuje v rozmezí 100 – 215 °C. Zároveň může nastat impakt různých menších těles. V této aplikaci je nutná regulace ventilátoru pomocí stavitelných lopatek.

Druhá aplikace je zaměřena na ventilátory automobilových tunelů, železničních tunelů apod. Ventilátor musí zvládat jak kontinuální dlouhodobý chod ve stálých podmínkách, tak i chod v havarijní situaci s vysokým rozdílem teplot a vyšším obsahem částic. Lopatky/ventilátory v těchto aplikacích musí splňovat podmínky podle normy EN 12101-3:2015. Klasifikace lopatek se uvádí podle teplotní odolnosti za běhu ventilátoru pro požadovanou dobu jako:

- $T = 250 \text{ °C}$, $t = 120 \text{ min}$
- $T = 300 \text{ °C}$, $t = 120 \text{ min}$
- $T = 400 \text{ °C}$, $t = 120 \text{ min}$

Po výše zmíněnou dobu si musí lopatky zachovat mechanické vlastnosti. V normě se dále neklade žádná podmínka ke stavu po uplynutí zmíněného času. Aplikace má podmínku na reverzaci tahu ventilátoru obrácením smyslu rotace. Tato podmínka je nutná z důvodu předem neznámého ohniska zvýšené teploty. Směr proudění vzdušiny musí být zvolen mimo případné únikové cesty. Aby byla reverze možná je nutné použít symetrického profilu lopatek. Možné aplikace jsou sepsány ve zprávách [11] [30].

Projekt a diplomová práce se dále zaměřuje na návrh odlehčené lopatky osového ventilátoru, která má sloužit jako náhrada k již používané hliníkové lopatce firmy ZVVZ MACHINERY, a.s. (Sažinova 888, 399 01 Milevsko).

Lopatka byla navržena jako sendvičová konstrukce s nosnou výztuží a jádrem. Jádro v sendviči má funkci hlavně při výrobě, kde slouží jako pozitivní forma pro nosnou výztuž. Jádro nemá významný vliv při přenosu sil.

První etapou projektu bylo zajištění a testování vhodných materiálů, které by vyhovovaly jak mechanickými a chemickými vlastnostmi, tak dostupností pro zadavatele. Výstupem první etapy jsou následující materiály:

Uhlíková výztuž T300, která má vysokou teplotní odolnost do 600°C (tato teplotní odolnost je uvedena v případě, že výztuž se nedostává do kontaktu s kyslíkem) a negativní koeficient roztažnosti. Vlákno má vysokou odolnost v chemicky agresivním prostředí jako je například geopolymer, který je silně alkalický a podporuje korozi.

Geopolymerní matrice GeoFly se skvělými vlastnostmi při zvýšených teplotách a v chemicky agresivním prostředí. Z důvodu pórovitosti matrice je nutné v aplikaci se zvýšenými částicemi opatřit geopolymer ochranným nátěrem. Více o geopolymerních maticích je popsáno v kapitole 3.2.1 nebo v pracích [23] [2].

Grenamat byl použit jako jádro lopatky. Jedná se o lisovaný vermikulit, který patří do skupiny šupinkovitých silikátů. Je charakteristický vnitřní mřížkovou strukturou, kde se v interlaminárním prostoru drží krystalická voda. Díky tomu nastává při zvýšené teplotě expanze materiálu z důvodu změny skupenství vody na plyn a porušení laminárních vrstev. Tento proces se nazývá exfoliace. Vermikulit odolává vysokým teplotám, je nehořlavý a dobře opracovatelný.

Matrice GeoFly a Grenamat byly výstupem minulých projektů s pracovištěm VŠCHT a s kralupským Technologickým centrem. [30]

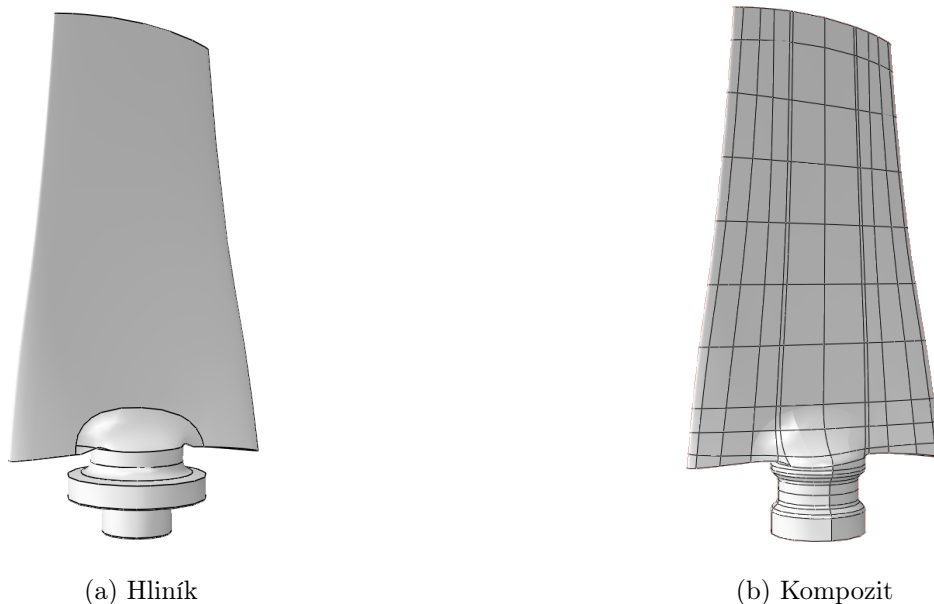
Po prvních testech nevyhovujícího kořene byl přidán zpevňující ocelový kroužek do paty lopatky. Důvody jsou uvedeny v podkapitole 5.1.

Porovnání původní hliníkové lopatky a navrhované kompozitové je vidět na obr. 5.

Hmotnost hliníkové lopatky je přibližně $m_h = 4,82$ kg a hmotnost odlehčené sendvičové lopatky je $m_s = 1,8$ kg. Odchyly hmotnosti lopatek se pohybovali v řádu 3% z důvodu jiných šarží vstupních materiálů a hlavně technologií výroby.

Spojení lopatky s rotorovou hlavou se v případě kovových lopatek provádí buď pomocí šroubového spoje nebo svěrným spojem. V případě kompozitu bylo pro maximální využití tahové pevnosti nutně zvolen spoj svěrný. Šroubový spoj by byl pro vláknové kompozity velice nevhodný z důvodu vytvoření slabého místa a porušení kontinuity vláken. Tvar kořene lopatky musel být navržen tak, aby vlákno kompozitu bylo co nejpřímější a neprocházelo přes žádné pravé úhly.

Z charakteru odstředivé síly vyplývá její proměnná závislost podél osy lopatky. Odstředivá síla se odvíjí od velikosti hmoty nad sledovaným řezem. Z toho vyplývá i množství použité výztuže podél osy lopatky. Na špičce je méně výztuže než v patní části. V rámci jedné statické zkoušky je možné ověřit vždy pouze jeden sledovaný řez a od toho se odvíjí použitá metodika v kapitole 5.2.



Obrázek 5: Porovnání geometrie původní (a) a navržené kompozitové lopatky (b)

Zatížení kořene bylo vypočteno z odstředivé síly jako

$$F_o = m_r \omega^2 r, \quad (4.1)$$

kde m_r je hmotnost lopatky nad požadovaným řezem, r je vzdálenost od vetknutí ke středu hmotnosti řezu a ω je úhlová rychlost, která byla vypočítaná pomocí požadovaných provozních otáček $n = 1500$ ot/min,

$$\omega = \frac{d\phi}{dt} = \frac{2\pi \cdot n}{60}. \quad (4.2)$$

Po dosazení (4.2) do vztahu (4.1) vychází odstředivá síla v místě přechodu listu do válcové části náboje $F_o = 12,6$ kN. V případě zkoušek listů leteckých vrtulí a lopatek axiálních ventilátorů je požadovaný koeficient bezpečnosti vůči odstředivé síle $k_s = 2$. Do bezpečnosti je dále nutné zahrnout zkoušky se zkušebními tělesy. Přípravky by měly být navrhovány na síly vyskytující se při zkouškách, nikoliv při provozu. [32]

Výroba lopatky probíhala mokrou kontaktní laminací z důvodu možnosti rychlé změny skladby kompozitu.

Pro finální úpravu lopatky byl v projektu zvolen nátěr značky GeoFly. Tento nátěr byl zvolen z důvodu složité pórovité struktury geopolymerní matrice.

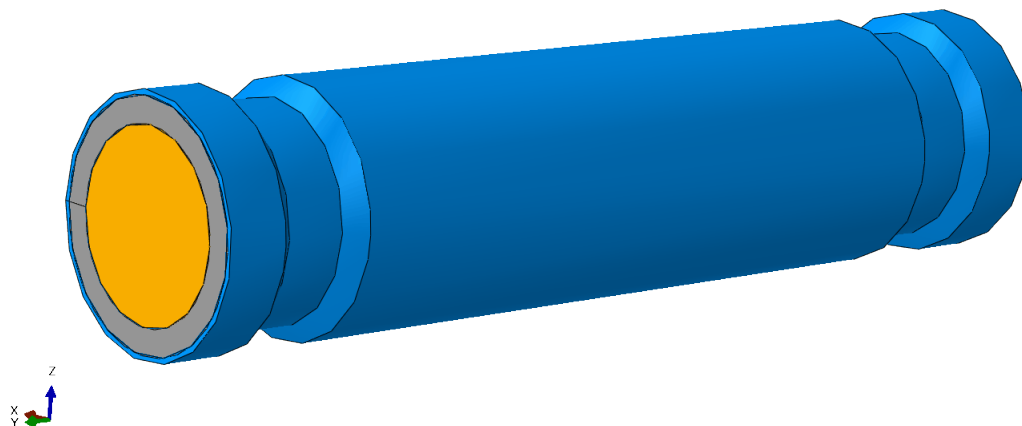
5 Experimenty

Uvedená kombinace materiálů jádra a matrice je v oboru tenkostěnných kompozitů a sendvičových konstrukcí nová a bez dostupných materiálových charakteristik. Z tohoto důvodu bylo v rámci projektu a diplomové práce nutné provést velké množství experimentů k nalezení skutečných materiálových parametrů. Tyto experimenty byly dále použity pro nalazení materiálových parametrů numerického modelu.

Příkladem provedených pomocných experimentů jsou ohybové zkoušky sendvičových desek a tahové zkoušky potahů z lopatek. [16] Experimenty na jednodušších tělesech, jako jsou nosníky byly zvoleny kvůli omezení technologických vlivů ve výrobě. Podobně i numerické modely se ladí od jednodušších po složitější modely, jako jsou finální lopatky.

5.1 Experiment tahové zkoušky dvoukořenu

Dvoukořen je uměle vytvořené zkušební těleso, které plní funkci hlavně při testování tahových zkoušek na kořeni lopatky. Díky geometrii se prakticky provádí dvě zkoušky kořenu zároveň, kde při destruktivní zkoušce nastane porušení vždy ve slabší části. Z toho vyplývá, že druhá část byla minimálně tak pevná. Geometrie dvoukořenu je uvedena na obr. 6.



Obrázek 6: Geometrický model dvoukořenu s podpěrným kroužkem



(a) Dvoukořeny



(b) Detail lomu

Obrázek 7: Porušená sada vzorků dvoukořenu s podpěrným ocelovým kroužkem [26]

Experiment dvoukořenu byl proveden v první fázi projektu pro ověření pevnosti tvarového zámku a zároveň k výběru vhodné skladby kompozitu a vhodné matrice. Zkoušky byly provedeny pracovištěm Woodcomp s.r.o. (Vodolská 4, 250 70, Odolena Voda).

První sada vzorků odhalila nevyhovující pevnost vermikulitového jádra v kořeni. Jádro (vermikulit) nedokázalo vydržet vysoké tlakové zatížení a materiál byl rozdrčen o ocelový náboj. Z toho důvodu tvarový zámek ztratil svůj tvar spolu s vrchní vrstvou kompozitu a dvoukořen byl vytržen z náboje při velmi nízkém využití kompozitní vrstvy.

Pro zpevnění a dosažení požadované únosnosti, byl do tvarového zámku přidán zpevňující ocelový kroužek, který byl nasazen na vermikulitové jádro a umístěn pod kompozitovou vrstvou.

Kompozitní potah byl vyroben kontinuálním kladením jednoho kusu tkaniny, ze které byl vytvořen potah o 5 vrstvách. Takto zvolená metoda omezila vytvoření slabého místa ve formě spáry podél tělesa. V rámci projektu bylo vyzkoušeno i kladení po polovičních vrstvách s vytvořením podélné spáry.

Výsledky byly použity k ověření správného navrhnutí tvarového zámku, kde bylo požadované místo porušení zvoleno jako horní hrana kořene. Tento cíl byl splněn. Sada porušených vzorků je vidět na obr. 7.

Z důvodu použití nových materiálů nebyla v době výroby vzorků plně odladěna technologie výroby. To mělo vliv na velký rozptyl výsledků a nemožného porovnání přesnějšího průběhu napětí s numerickým modelem. [26] Výsledná hodnota zatížení dosahovala pro materiálovou variantu s geopolymerem okolo $F_d = 30$ kN, což spadá do požadované bezpečnosti pro sílu F_o .

5.2 Statická tahová zkouška lopatky

Jak bylo popsáno v teorii ventilátoru, kritické místo lopatek se obecně nachází v kořeni při přechodu z listu do náboje. Z tohoto důvodu je předpokládáno prvotní porušení v tomto místě. Před návrhem statické zkoušky byla tato skutečnost ověřena numerickým výpočtem viz podkapitola 6.1.1.

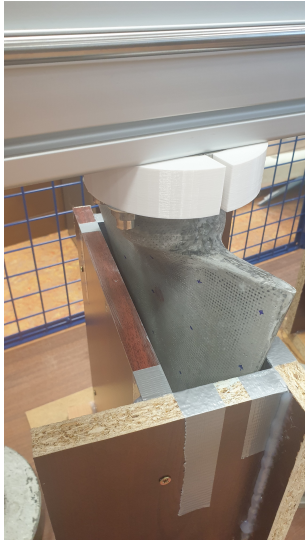
Z důvodu složitého tvaru lopatky bylo nutné pečlivě navrhnout, případně vybrat upínací přípravky. Statická zkouška byla koncipována na zkušební trhací stroj Zwick/Roell Z050, který je dostupný v rámci pracoviště NTIS.

Problém upnutí kořene pro statickou zkoušku byl vyřešen v návrhu upnutí pro dynamické zkoušky. Přípravek pro upnutí se skládá z dostupného 3-čelistového soustružnického sklíčidla s centrickým upínáním VSK-10A a dále navržených upínacích čelistí. Přípravek byl navržen s dostatečnou variabilitou v případě změny geometrie kořene. Návrh přípravku je popsán v rámci projektu ve zprávě [19].

Složitá geometrie dále stěžovala upnutí na ploše listu k přenosu zatížení. Upnutí sevřením části lopatky bylo nepřijatelné z důvodu nutného porušení a nedodržení požadovaného typu zatížení. Problém byl zjednodušen díky znalosti sledovaného kritického místa. Část listu byla zalita do pryskyřice ve tvaru kvádrů, která přenášela zatížení do požadovaného místa bez porušení vrchních částí lopatky.

Pro zalití byla vyrobena jednorázová forma z laminované dřevotřísky. Pro utěsnění spojů na formě byla použita montážní pěnová oboustranná páska, společně s textilní páskou potaženou polyethylenem. Tímto způsobem byla vytvořena utěsněná forma. Pro snadné odebrání byl dále aplikován separátor, na karnaubské bázi smíchaný s jinými syntetickými vosky od značky *TR-102 REGULAR MOLD RELEASE*. K zalití byla použita dvousložková epoxidová pryskyřice, *VEROPAL UV Plus 100*, jedná se o čirou pomalu tuhnoucí pryskyřici s tuhnutím do větší tloušťky. Doba tuhnutí se uvádí do 5 dnů. Lopatka byla zavěšena nad formou, tak aby se koncová hrana lopatky nedotýkala dna formy a lopatka byla zalita po všech požadovaných plochách. Pro snadné a pevné upnutí lopatky v závěsu byla použita plastová náhrada náboje vytištěná na 3D tiskárně. Zavěšená lopatka je vidět na obr. 8.

Po vytvrzení pryskyřice byl výrobek odebrán z formy a následně byly do zhotoveného výrobku provrtány otvory podle šablony. Kolmost vrtu byla zajištěna použitím stojanové vrtačky. Přenos zatížení byl zajištěn dvojicí ocelových plechů o tloušťce 5 mm. Plechy byly k zalité lopatce upevněny pomocí šroubových spojů M12 v celkovém počtu 10×M12. Plech byl spojen ke spojovacímu dílu, který dále vede přes desku k horní kulové přírubě. Kulová příruba byla použita z důvodu zajištění osového namáhání. Přípravky statické zkoušky jsou popsány ve zprávě [20].



(a) Forma



(b) Závěs

Obrázek 8: Zavěšená lopatka v lici formě (a), zavěšená lopatka (b)

Sestava lopatky je zobrazena na schématu obr. 9a, výpis použitých dílů je uveden v tab. 3.

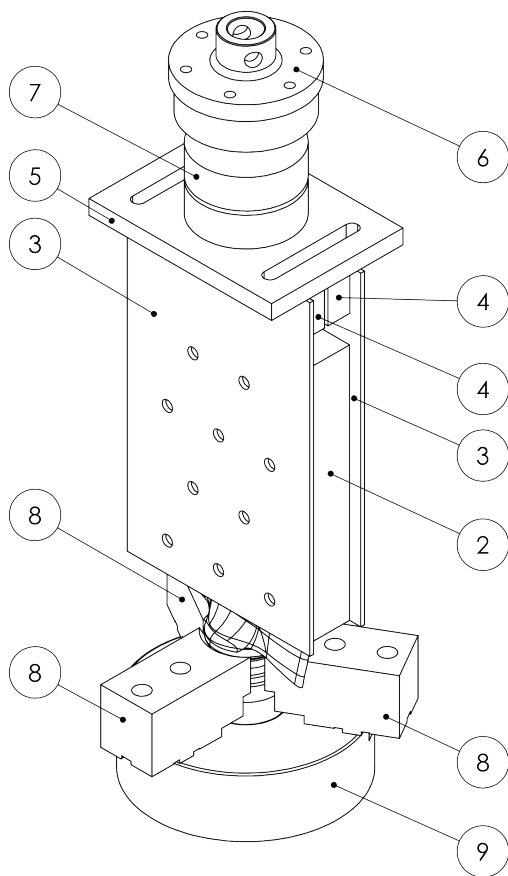
Tabulka 3: Použité díly statické zkoušky [20]

Číslo dílu	Název dílu	Množství
2	Zalitá lopatka	1
3	Rozváděcí plech	2
4	Spojovací díl	2
5	Deska pod BJ	1
6	Horní příruba	1
7	BJ-63-M02	1
8	Čelist	3
9	Sklíčidlo VSK-10A	1

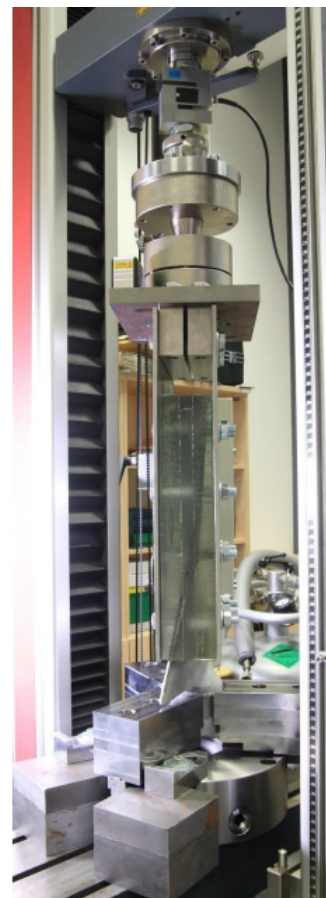
5.2.1 Výsledky tahové zkoušky

Pro vlastní experiment byl použit zkušební stroj Zwick/Roell Z050, který je vidět společně s celou sestavou pro tahovou zkoušku na obr. 9b. Rychlost zatěžování byla $v = 1 \text{ mm/s}$.

Z experimentu byla získána závislost síla–posunutí. Posuvy odpovídají



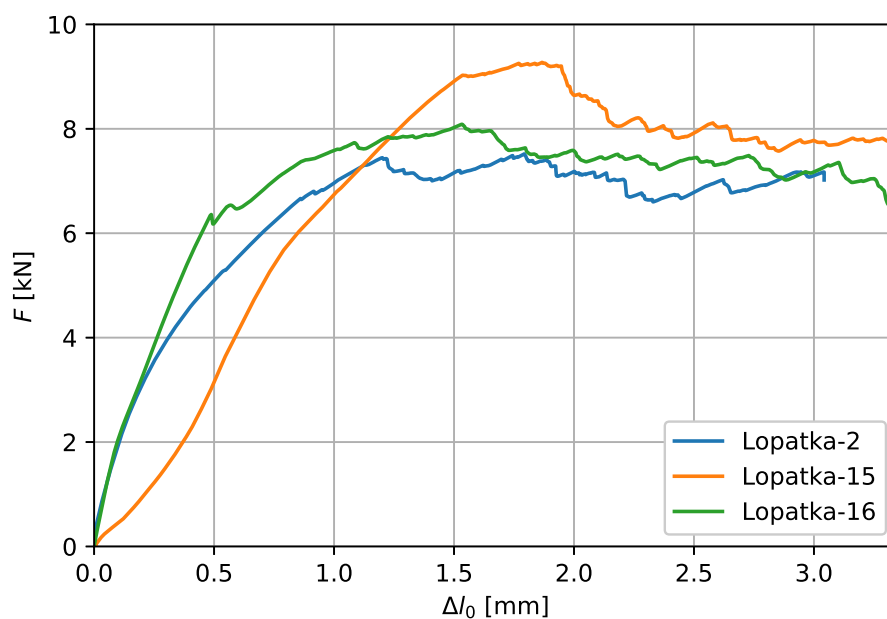
(a) Schéma sestavy



(b) Reálná sestava

Obrázek 9: Schéma statické zkoušky [20] (a), reálná sestava před zkouškou lopatky č.2 (b).

posuvům na příčnicku, nikoliv posuvům na lopatce. Závislost pro lopatky č.2, č.15, č.16 je uvedena na obr. 10.



Obrázek 10: Závislost síla–prodloužení pro tahovou zkoušku lopatek.

První porušení lopatek bylo pozorováno v okolí síly $F_t = 6,8$ kN. Maximální dosažená síla pro lopatky byla:

Lopatka č.2 $F_{max} = 7,4$ kN,

Lopatka č.15 $F_{max} = 9,3$ kN,

Lopatka č.16 $F_{max} = 8,1$ kN.

Při porovnání s předpokládanou odstředivou silou o hodnotě $F_o = 12,6$ kN se jedná o velice nedostačující mezní síly vůči požadované hodnotě bezpečnosti. Jiný charakter křivky zatěžování pro lopatku č.15 bylo možné vysvětlit z postupného vymezování vůlí v šroubových spojích na sestavě statické zkoušky.

Vzorek č.2 a č.15 byl po dosažení maximální síly odlehčen a následně zatěžován do úplné destrukce vzorku, kde se kořen oddělil od zbytku lopatky. Z prvních vzorků byla odhalena absence výztuže v místě přechodu z kořene do listu lopatky. Tento nedostatek plyne z výrobní technologie a nemožného kladení výztuže v požadovaném směru. Porušený vzorek je na obr. 11.



Obrázek 11: Porušení lopatky č. 2 při dalším zatížení až do úplné destrukce. [15].

5.3 Dlouhodobá zkouška v agresivním prostředí

Odolnost materiálu proti agresivnímu prostředí z dlouhodobého hlediska je testována přímo v provozu elektrárny Prunéřov. Jedná se o statickou zkoušku, kdy lopatky jsou upevněny v prostoru difuzoru za rotorovými lopatkami. Tento postup byl zvolen z důvodu bezpečnosti provozu ventilátoru. Zkouška má potvrdit chemickou a tepelnou odolnost při proudění média v delším časovém úseku. V době psaní této práce nejsou dostupné žádné výsledky. Technické zprávy zabývající se touto zkouškou [7] a instalací [6]. Upevněná kompozitová lopatka je vidět na obr. 12. Fotografie byla pořízena v rámci montáže.

5.4 Modální analýza–experiment

Modální analýza je dynamická zkouška, která identifikuje dynamické vlastnosti mechanické konstrukce jako jsou vlastní frekvence a k nim příslušné



Obrázek 12: Lopatka namontovaná v agresivním prostředí [31].

vlastní tvary. Experimentální modální analýza byla jako první provedena na krátkých sendvičových nosnících, které byly použity pro validaci výpočtového modelu z hlediska použitého materiálu [13]. Dále byla modální analýza provedena na poskytnutých lopatkách s pořadovým číslem č.2, č.3 a č.13 – č.16. Jelikož se jedná o nedestruktivní zkoušku byla většina lopatek měřena před tahovými a ohybovými zkouškami. Měření bylo provedeno ve dvou typech uložení:

1. **Volná** – lopatka byla uložena na molitan k izolaci lopatky od vlivů jiných těles a případnému ovlivnění naměřených frekvencí.
2. **Upnutá** – lopatka byla vetknuta pomocí 3-čelistového soustružnického sklíčidla, které bylo dále upevněno na tuhou konstrukci

Měření modálních vlastností lopatky bylo provedeno pomocí přilepeného snímače vibrací a modálního kladívka pro buzení. Měření bylo realizováno na 40 bodech listu lopatky. Z výsledků byly identifikovány vlastní frekvence a k nim příslušné vlastní tvary. Měřící aparatura byla omezena do frekvencí 1600 Hz, což pro případ lopatek zachycovalo prvních 5–6 vlastních tvarů. Konkrétní hodnoty vlastních frekvencí pro volnou lopatku jsou uvedeny v tab. 4 a pro upnutou lopatku v tab. 5. Pro případ upnutých lopatek s vyšším pořadovým číslem nebyl naměřen první vlastní tvar.

Větší rozptyl naměřených hodnot s nízkým pořadovým číslem lopatek (č.2, č.3) je v přímé korelaci s nedoladěným výrobním procesem. U zbytku lopatek s vyšším pořadovým číslem (č.13 – č.16) je vidět nízký rozptyl vlastních frekvencí mezi jednotlivými lopatkami. Z důvodu odladěnější výrobní technologie je vidět značný rozdíl mezi novějšími a staršími lopatkami. Proto bylo nutné starší lopatky vyřadit z vyhodnocení v dalším textu.

Tabulka 4: Hodnoty vlastních frekvencí volných lopatek

Číslo lopatky	Vlastní frekvence [Hz]					
	Tvar 1	Tvar 2	Tvar 3	Tvar 4	Tvar 5	Tvar 6
Lopatka 2	389	524	827	998	1427	1560
Lopatka 3	369	469	783	903	1349	1474
Lopatka 13	413	581	885	1113	1559	
Lopatka 14	418	590	892	1133	1577	
Lopatka 15	418	586	921	1133	>1600	
Lopatka 16	416	586	947	1142	>1600	

Tabulka 5: Hodnoty vlastních frekvencí upnutých lopatek

Číslo lopatky	Vlastní frekvence [Hz]					
	Tvar 1	Tvar 2	Tvar 3	Tvar 4	Tvar 5	Tvar 6
Lopatka 2	116	360	538	834	1124	
Lopatka 3	112	324	502	768	1088	1428
Lopatka 13		351	510	854	1057	1558
Lopatka 14		364	533	877	1111	>1600

Experimentální modální analýza na lopatkách byla provedena pro validaci výpočtového modelu lopatky. Zpráva zabývající se experimentální modální analýzou je [14].

5.5 Ohybová zkouška–experiment

Při numerických simulacích nebylo dosaženo shody s materiálovými parametry u statických a dynamických zkoušek. Z toho důvodu byl navrhnout další typ zkoušky k sjednocení a ověření možných výsledků.

Ohybová zkouška byla provedena na lopatce č. 3 (Ge 03) až do porušení a lopatka č. 13 (Ge 13) byla zatížena pouze do stavu, než by došlo k trvalému poškození. Opakované zatížení do konečné hodnoty potvrdilo nedestruktivní hranici. Lopatka byla napozicována, tak aby špička lopatky byla vodorovně se zemí a kolmá na zátěžnou tyč upevněnou na vrchní přírubě. Zatěžování bylo realizováno pomocí ocelové tyče o průměru 20 mm s hladkou rovnou styčnou hranou. Hrana tyče byla zároveň s hranou lopatky. Průhyb v místě působí sil byl měřen pomocí extenzometru. V místech 100 mm a 200 mm od koncové hrany lopatky byl průhyb měřen pomocí laserových snímačů. Celá sestava je zobrazena na obr. 13.

Hodnoty průhybu lopatky při zatěžování silou $F_b = 200$ N jsou uvedeny v grafu na obr. 14.

Z grafu je možné vyhodnotit výsledky statické ohybové zkoušky jako konzistentní pro dvě generace lopatek s označením č.3 a č.13. Polohy třech měřených bodů v prostoru průhyb–pozice jsou kolineární. Tato skutečnost může značit nedostatek ve vetknutí lopatky.

5.6 Pomocné experimenty lopatky

Pro získání reálné geometrické skladby kompozitu a vzorků pro provedení mechanických zkoušek materiálů byla lopatka rozdělena do pásků. Odsazení pásků bylo navrženo tak, aby v jednom pásku bylo zachyceno rozhraní přidávané vrstvy nosné výztuže. Rozdělení bylo provedeno na pokosové pile. Rozdělená lopatka s detailem vnitřní části je vidět na obr. 15.

Z pásků bylo dále odebráno vermikulitové jádro, které se následně obrábělo do kvádrů pro přesné změření hustoty materiálu. Kvádry byly dále použity pro experimentální změření tlakového modulu.

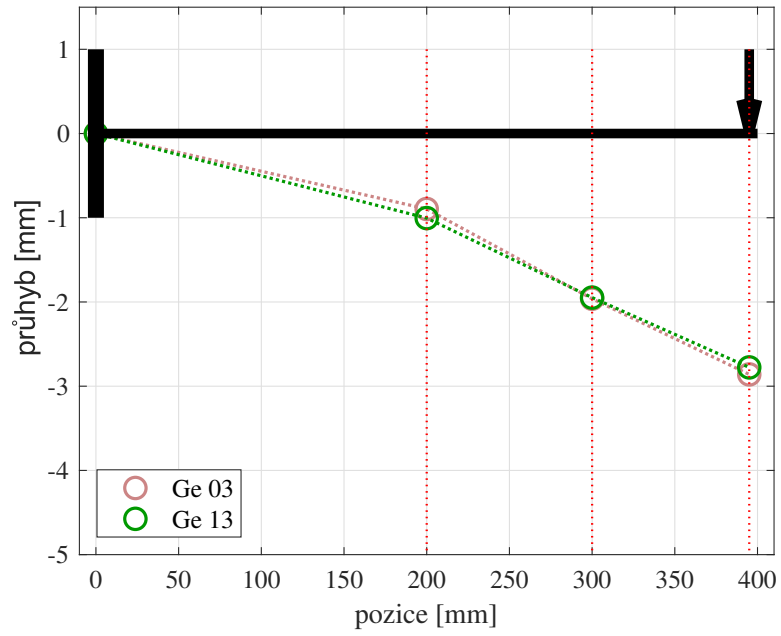
Kompozitový potah byl očištěn od jádra a byly změřeny tloušťky vrstev po délce a šířce lopatky. Z tohoto měření byly vyhodnoceny průměrné hodnoty tloušťky pro místa s přelepem a bez přelepu. Hodnoty pro místo s přelepem $\overline{h_{pr}} = 0,413$ mm a v místě bez přelepů $\overline{h_j} = 0,464$. U vybraných nezkroucených pásků byla provedena tahová zkouška pro změření taho-



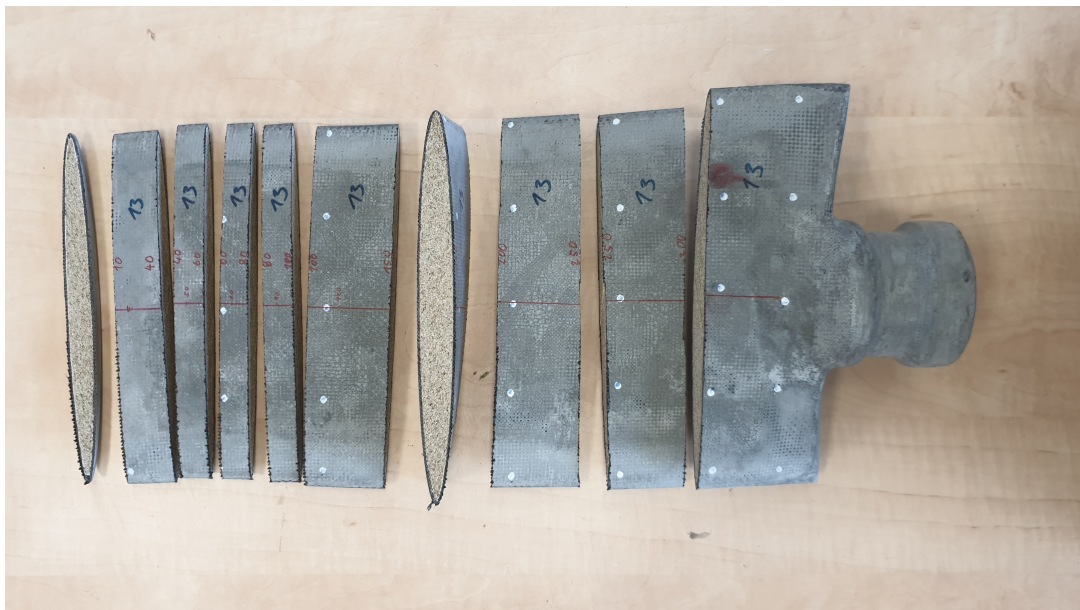
Obrázek 13: Sestava experimentální ohybové zkoušky lopatky

vého modulu kompozitu. Výsledky těchto experimentů jsou shrnuty v tab. 6, kde tučně jsou uvedeny změřené materiálové parametry. Youngův modul pro Grenamat byl určen porovnáním experimentu a numerické simulace modální analýzy vermikulitové desky. [18]

Z experimentu bylo pozorováno nedostatečné prosycení nosné výztuže maticí v přelepech lopatky. Toto zjištění bylo dále potvrzeno analýzou výrobního procesu.



Obrázek 14: Výsledky z ohybové zkoušky lopatky



Obrázek 15: Rozdělená lopatka

Tabulka 6: Materiálové parametry změřených materiálů

Materiál	E GPa	ρ [kg.m ⁻³]
Geopolymerní kompozit	21,0	1680
Grenamat	0,5	560

6 Numerické simulace

Pro definici a vyhodnocení veškerých modelů v následující kapitole byl použit software Abaqus CAE 2017/2021, samotné výpočty byly provedeny v Abaqus/standard, což je univerzální řešič konečných prvků na bázi implicitního integračního schématu.

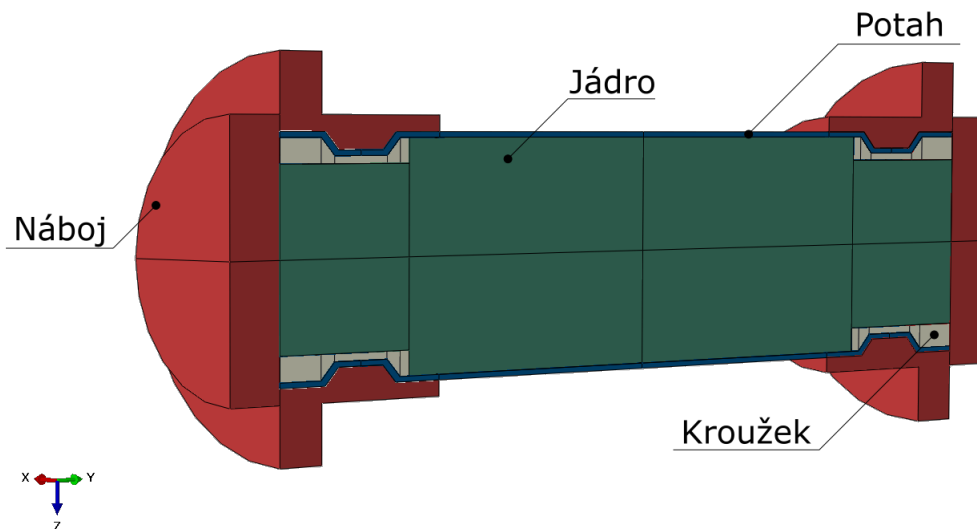
6.1 Dvoukořen

Dvoukořen byl modelován pro nalezení možné pevnosti tvarového zámku vyztuženého podpěrným kroužkem a ověření výskytu maximálního napětí v požadovaném kritickém místě. Jak bylo popsáno výše, jedná se o odlehčený sendvičový dvoukořen s kompozitním potahem.

Model byl dále použit k otestování sourodosti výsledků při použití různých modelovacích metod kompozitů a zatížení. Tento postup byl zvolen z důvodu menší náročnosti výpočtu a jednodušší geometrie než v případě lopatky.

Geometrie byla modelována přímo v prostředí Abaqus podle dodaných výkresů ve zprávě [33]. Z důvodu velmi malých poloměrů a zaoblení na hranách tvarového zámku byly tyto zaoblení a zkosení zanedbány. Uvažování zaoblení by vedlo k nevyhovující výpočetní síti se silně zdeformovanými elementy, které by ovlivnily výsledky a stabilitu výpočtu. V případě zachování celé geometrie by bylo nutné použít velice jemnou výpočetní síť a použít dedikovaný software na vytvoření výpočetní sítě. Při zanedbání musely být zkontrolovány hodnoty napětí v těchto místech, kvůli možnému výskytu nereálných maxim. V případě těchto numerických simulací nebyly pozorovány takové špičky napětí, aby převyšovaly předpokládané kritické místo.

Model byl rozdělen na samostatné části: Jádro, potah, kroužek a náboj. Rozdělení je zobrazeno na obr. 16. Na obrázku je dále znázorněno rozdělení geometrie podle různě posunutých rovin. Toto rozdělení bylo provedeno z důvodu využití symetrií a sledovaných rovin při automatickém síťování. V případě nevyužití rozdělení byla výpočetní síť zdeformovaná a nevyhovující.



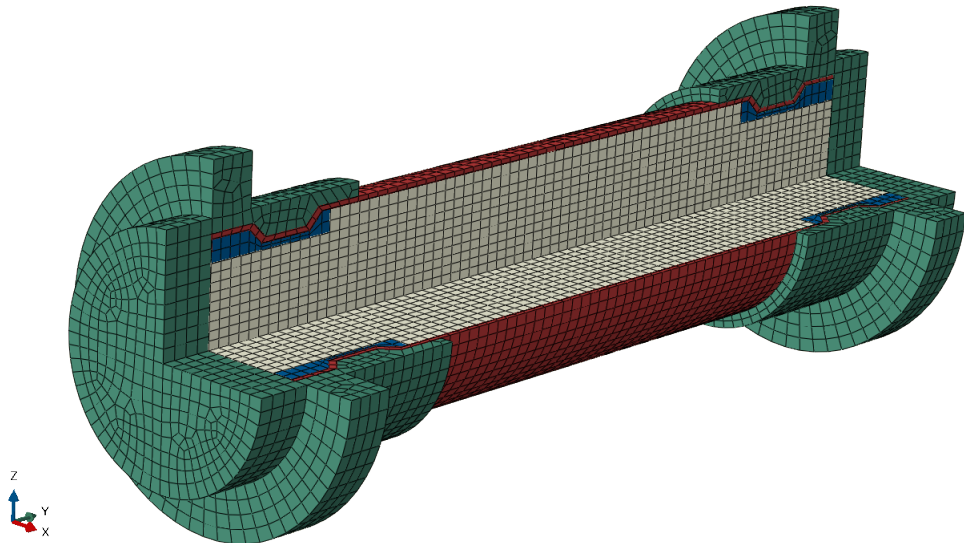
Obrázek 16: Výpis částí dvoukořenu v řezu

Výpočetní síť byla vytvořena pomocí parametrů velikosti elementů a počtu elementů na požadovaných hranách.

Ze zkušenosti a doporučení bylo nutné dodržet konzistentní síť jádra i potahu, tak aby kontaktní plochy měli koincidentní uzly. V případě nedodržení této podmínky dochází na rozhraní sousedních sítí k výkyvům v napětí. Tato skutečnost byla pozorována i v průběhu modelování této úlohy.

Jádro a ocelový kroužek byly diskretizovány pomocí hexaedrických prvků označené v prostředí Abaqus jako C3D8, jedná se o univerzální lineární cihlový prvek, který je plně integrovaný s $2 \times 2 \times 2$ integračními body. Pro kompozitní potah byly použity 4 uzlové skořepinové prvky s označením S4. Prvek je plně integrovaný pro všeobecné použití s konečnou membránovou deformací. Tento prvek v prostředí Abaqus umožňuje variabilitu vrstvení, která byla žádána z důvodu neznámé finální geometrie a skladby kompozitu. Z tohoto důvodu byl dále model vytvořen parametricky pomocí skriptu v jazyce python pro rychlé změny vstupních dat a případné optimalizace. Hexaedrické a 4 uzlové prvky byly použity z důvodu dobrých numerických výsledků s malým rozptylem při vytvoření strukturované sítě ve směru předpokládaného dominantního napětí.

Kompozitní potah dvoukořenu byl modelován ve dvou variantách. S potahem vytvořeným z objemových a skořepinových prvků. Výpočetní síť dvoukořenu s potahem modelovaným pomocí objemových prvků je uvedena na obr. 17.



Obrázek 17: Výpočetní síť dvoukořenu

Dvoukořen byl v rámci projektu modelován ve dvou materiálových variantách z důvodu posouzení vhodnosti materiálu. Další text byl omezen pouze na výsledný použitý materiál.

Materiály částí jádra, kroužku a náboje byly modelovány jako izotropní elastické materiály, bez definovaných mezí porušení.

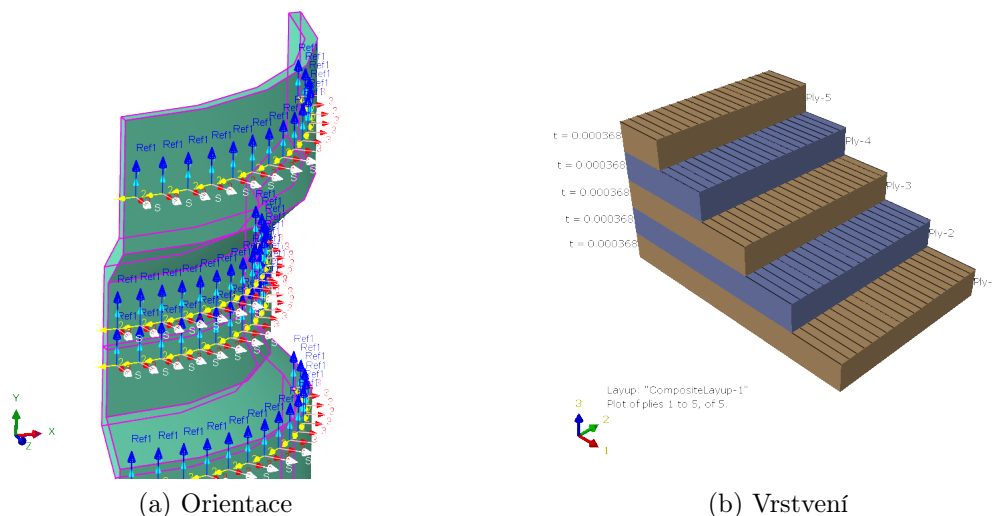
Potah byl modelován v případě objemových 8 uzlových prvků jako ortotropní materiál definovaný pomocí 9 nezávislých parametrů (E_{11} , E_{22} , E_{33} , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} , G_{23}). V případě použitých skořepinových prvků byl použit materiálový model laminy s 6 nezávislými parametry (E_{11} , E_{22} , ν_{12} , G_{12} , G_{13} , G_{23}). [29]

Youngův modul byl převzat z experimentů, kde kvůli nedoladěné technologii výroby nebyla zaručena vždy stejná tloušťka kompozitní vrstvy, z důvodu přebytku matrice. Aby se předešlo mylným hodnotám v numerické simulaci byl skript upraven, tak aby hodnota z experimentu byla vztažena na počet vrstev kompozitu.

Z důvodu použití tkaniny s plátňovou vazbou, kde orientace vláken je $0/90^\circ$ vůči ose zatěžování u rotačně symetrického tělesa, byly smykové charakteristiky uvažovány jako pro běžný uhlíkový kompozit s epoxidovou maticí.

Pro případnou potřebu modální analýzy byla materiálům definována hustota, která byla ve všech případech uvažována homogenní.

Kompozit byl definován s 5 vrstvami nosné výztuže a tloušťkou jedné



Obrázek 18: Orientace kompozitu dvoukořenu (a), detail vrstvení kompozitu (b)

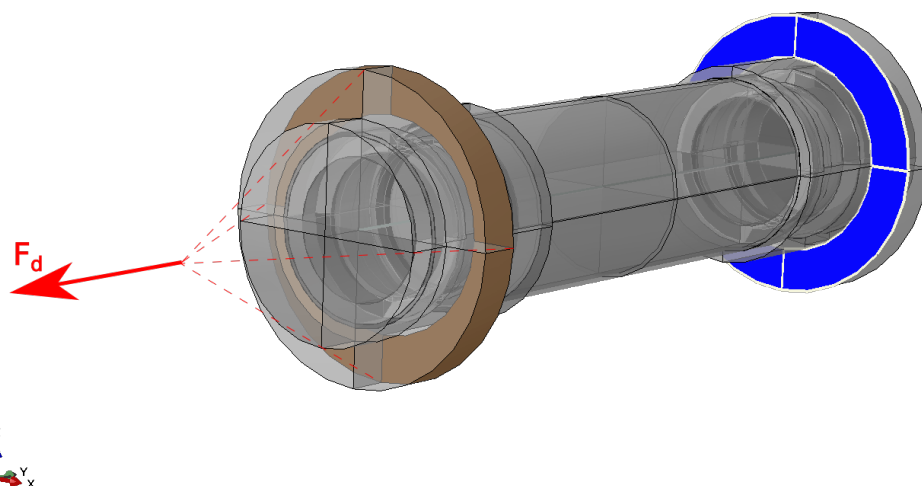
vrstvy $h = 0,368$ mm. Kladení kompozitu bylo uvažováno kontinuální bez dělicí spáry. Souřadnicový systém pro orientaci kompozitu byl vytvořen podle normály potahu s hlavním směrem v kladném směru osy jádra. Detail kompozitu a souřadnicový systém (materiálové souřadnice 1, 2, 3) je vidět na obr. 18.

Zatížení dvoukořenu bylo modelováno pomocí dvou přístupů. První varianta, kde zatížení bylo řešeno jako kontaktní úloha dvoukořenu v místě tvarového zámku s hliníkovým nábojem. Následně byl náboj zatížen po ploše vnitřního prstence silou F_d . Druhá varianta byla zjednodušením na zatížení pomocí bodové síly. Zatížení na potah bylo modelováno svázáním referenčního bodu s kontaktní plochou a následné zatížení referenčního bodu silou F_d . Svázání plochy a referenčního bodu bylo provedeno pomocí funkce distribuční vazby (*structural distributing*), která byla pomocí okrajové podmínky provedena pouze ve směru zatížení. Takto definovaná vazba rovnoměrně rozděluje zatížení z referenčního bodu do všech svázaných uzlů.

Velikost zatížení byla použita podle experimentu, kde byla maximální dosažená hodnota zatěžující síly přibližně $F_d = 30$ kN.

Vetknutí druhé části kořene je modelováno podobně jako zatížení ve dvou variantách. V případě použití náboje byla část náboje vetknuta po vnější ploše prstence. V druhém případě byl na kontaktních plochách vetknut kompozitní potah. Vetknutí bylo provedeno pomocí omezení stupňů volnosti uzlů na zmíněných plochách. V případě skořepinových prvků bylo zamezeno posuvům a rotacím ve všech směrech. V případě objemových prvků stačilo

zamezit posuvům. Takto definované vetknutí vyplývá z definice použitých elementů. Okrajové podmínky a zatížení jsou znázorněny na obr. 19, kde modrá část ve vzdálenějším náboji je vetknuta a hnědá část v bližším náboji je svázána vazbou.

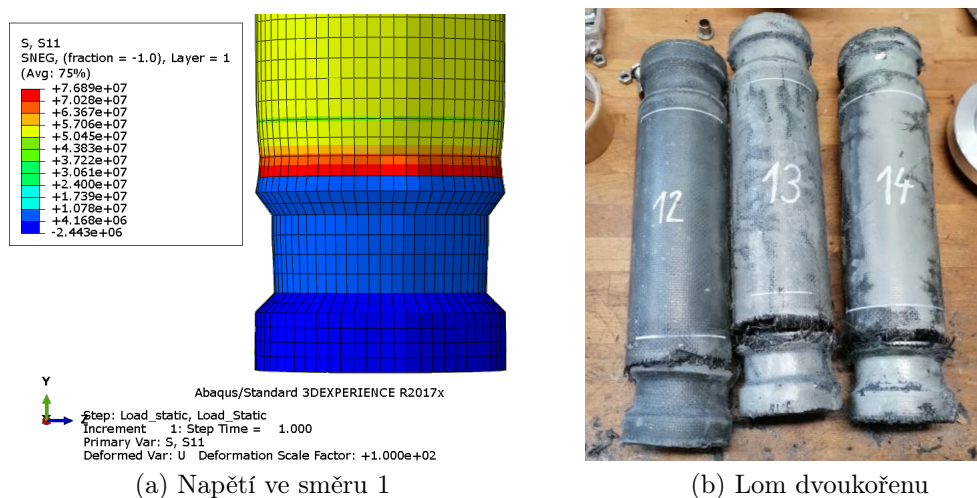


Obrázek 19: Okrajové podmínky dvoukořenu se zatížením pomocí náboje

Mezi jádrem, ocelovým kroužkem a potahem nebyla předpokládána žádná kohezivně pružná spojení. Z toho důvodu byl lepený spoj modelován jako dokonale tuhý. K tomuto byla využita funkce *Tie* [1]. Dokonale tuhý spoj byl dále uvažován i u spojení kompozitového potahu s jádrem a zpevňujícím kroužkem.

V případě zatěžování pomocí náboje byl definován kontakt mezi nábojem a dvoukořenem na styčných plochách. Kontakt byl definován jako *Hard contact* bez tření. *Hard contact* definuje základní model pro vztah kontaktního tlaku a překrytí styčných ploch, který řídí pohyb a vlastnosti povrchů v analýze mechanického kontaktu. *Hard contact* je jedním z možných modelů, který v případě nenulové kladné hodnoty překrytí nemá limit na výsledný tlak mezi tělesy. Model se třením definuje sílu odolávající relativnímu tangenciálnímu pohybu povrchů v analýze mechanického kontaktu. Model bez tření byl zvolen z důvodu vytvoření porovnatelných zatěžujících modelů. [1] Kohezivní chování v kontaktu nebylo uvažováno.

V prvotních fázích navrhování byl model laděn při redukované integraci. Redukovaná integrace je nastavena v diskretizaci a mění počet integračních bodů v použitých prvcích. Uvedené výsledky jsou vypočteny pomocí plné integrace.



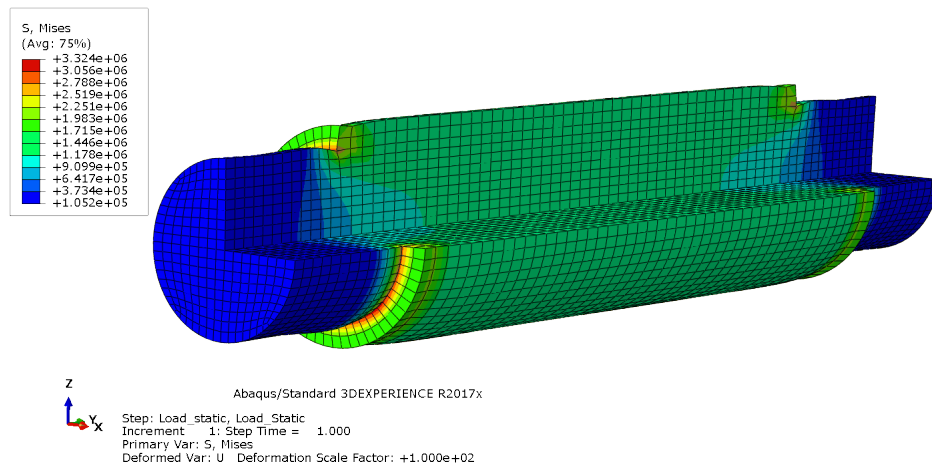
Obrázek 20: Porovnání kritického místa v numerické simulaci (a) a experimentu (b)

6.1.1 Dvoukořen výsledky

Jak již bylo zmíněno z důvodu použití nových materiálů a nedostatku dostupných materiálových dat nebylo možné výpočet vyhodnotit z pohledu koeficientu porušení. Porovnání mezi numerickou simulací a experimentem je uvedeno na obr. 20, kde se jedná o konfiguraci potahu modelovaného pomocí skořepinových prvků a zatížení a upnutí pomocí kontaktu s nábojem. Místo největšího napětí odpovídá místu lomu dvoukořenu v experimentu. Vyhodnocení napětí bylo provedeno pomocí napětí S11 v materiálovém směru 1, jedná se o dominantní směr napětí. Nejvyšší napětí se vyskytuje v předpokládaném místě horní hrany tvarového zámku.

Dále je na obr. 21 uveden výsledek napětí v jádru, pro názornost byla skryta čtvrtina jádra. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí ekvivalentního napětí podle Von Misesa. Nejvyšší napětí se vyskytuje v předpokládaném místě úběru materiálu.

Výsledky mezi modely s různými přístupy modelování potahu pomocí různých prvků konkrétně: skořepinové a objemové prvky s různými kombinacemi zatěžování pomocí kontaktu a síly vztaženou přímo na plochu potahu (označení O.P.) jsou uvedeny v tab. 7. Vyhodnocení bylo provedeno na vrstvě kladené nejbližší k jádru (vrstva 1). Jedná se o nejkritičtější vrstvu pro hlavní směr napětí. Uvedené hodnoty v tab. 7a–7b jsou maximální napětí v daném směru pro nastavené průměrování napětí v integračních bodech 75%. Hodnoty posunutí ve směru osy x jsou uvedeny v tab. 7c, kde z důvodu rotační



Obrázek 21: Výsledné napětí pro jádro v konfiguraci skořepina kontaktní úlohy

symetrie jsou hodnoty pro $x = z$. Hodnoty ve směru osy y jsou v tab. 7d. Z výsledků napětí je vidět rozdíl mezi metodou modelování potahu, kde skořepinové prvky dosahují větších hodnot napětí S11. U skořepiny byl pozorován velký nárůst napětí S11 u vrstev 1–2. Vrstvy 3–5 mají podobné výsledky pro oba přístupy modelování potahu. Pro posunutí jsou pozorovány konzistentní výsledky.

6.2 Lopatka

V této práci bylo pokračováno na modelu lopatky ze zprávy [25]. Model vychází z CAD geometrie dodanou pracovištěm Woodcomp. Geometrie byla upravena pro potřeby výpočtu rozdělením geometrie pomocí řezných ploch. Takto upravená geometrie splňuje potřebné požadavky pro vytvoření kvalitní výpočetní sítě.

Zjednodušení geometrie bylo dále provedeno v kořeni lopatky z důvodu nekonzistentních sítí v případě uvažování malých zaoblení. V případě dodržení konzistentnosti byla síť v části přechodu kořen–list nevyhovující.

Kompozitní potah byl vytvořen jako obal objemu lopatky bez geometrické tloušťky z důvodu použití skořepinových prvků.

Model se skládá ze dvou částí: jádra a potahu, kde jádro bylo rozděleno na sekce jádro a zpevňující kroužek pomocí řezných ploch. Rozdělení bylo provedeno z důvodu rozdílných materiálů sekcí. Takto použité rozdělení je pouze ve vlastnostech a není potřeba použít dodatečné spojení dvou částí z důvodu identických uzlů na styčných plochách.

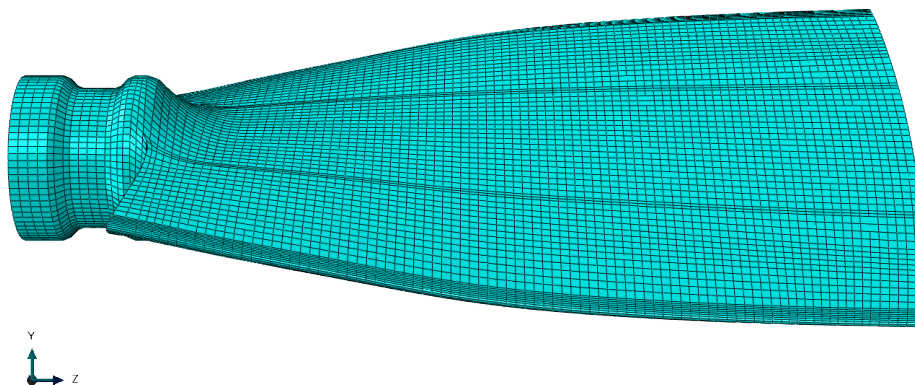
Takto upravená geometrie byla exportována do prostředí Abaqus kde byla vytvořena strukturovaná výpočetní síť. Síť byla vytvořena pomocí zadaného

Tabulka 7: Porovnání kombinací zatížení a typ prvků pro napětí a posunutí ve směru x a y

(a) Napětí ve směru 1			(b) Napětí ve směru 2		
S11 [MPa]	Kontakt	O.P.	S22 [MPa]	Kontakt	O.P.
S4	76,89	76,97	S4	3.05	3.87
C3D8	58,63	58,61	C3D8	5.65	6.69

(c) Posunutí ve směru x			(d) Posunutí ve směru y		
U1 [μm]	Kontakt	O.P.	U2 [μm]	Kontakt	O.P.
S4	18,35	18,57	S4	645,80	621,10
C3D8	18,47	18,72	C3D8	622,70	622,90

počtu elementů na předem vytvořených hranách pomocí řezů a základní velikosti elementu o hodnotě $h_v = 4,65\text{mm}$. Jádru lopatky bylo jako v případě



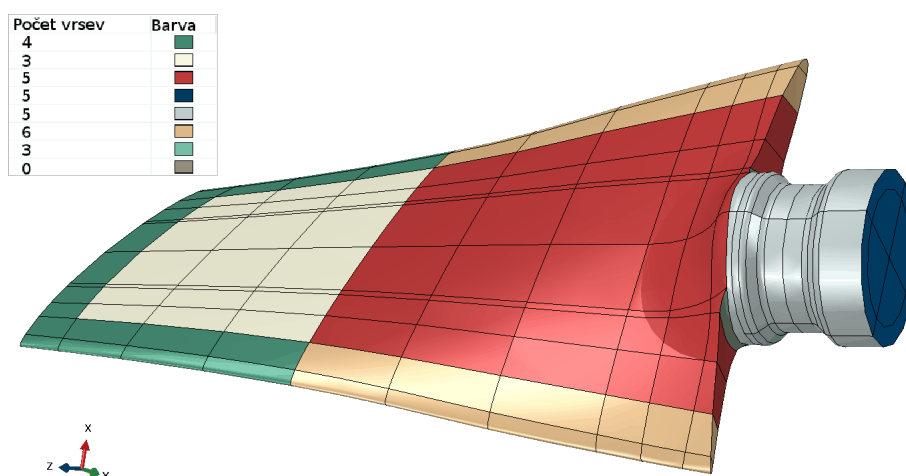
Obrázek 22: Výpočetní síť lopatky

dvoukořenu diskretizováno pomocí hexaedrických prvků C3D8. Pro kompozitní potah byly použity 4 uzlové skořepinové prvky s označením S4. Jako v případě dvoukořenu bylo nutné dodržet konzistentnost dvou sítí jádra a potahu. Pro validaci výpočetní sítě byla provedena citlivostní analýza se vstupem počtu elementů a výstupem vlastních frekvencí. Pro různý počet

elementů byly získány konzistentní výsledky.

Materiál jádra byl modelován jako izotropní, elastický, homogenní materiál, bez definovaných mezí porušení. Potah byl modelován pomocí materiálového modelu laminy, který předpokládá nižší tloušťku než šířku a délku a je zadán pomocí 6 parametrů (E_{11} , E_{22} , ν_{12} , G_{12} , G_{13} , G_{23}). [29]

Oblast potahu byla původně rozdělena na 7 částí podle počtu vrstev nosné výztuže jak bylo uvedeno ve výkresech, v průběhu práce byla přidána jedna část navíc z důvodu porušení kontinuity potahu v místě přechodu z kořene do listové části lopatky. Rozdělení je znázorněno graficky na obr. 23. Každé



Obrázek 23: Rozdělení lopatky podle počtu vrstev a přelepů

části byla definována kompozitní skladba, kde bylo určeno: počet vrstev, tloušťka vrstvy, materiál, souřadnicový systém vrstvy, natočení vrstvy vůči souřadnicovému systému a počet integračních bodů přes vrstvu.

Skládání kompozitu se děje dovnitř lopatky od vnějšího potahu. Tímto způsobem byla vždycky dodržena požadovaná geometrie lopatky při nízkém zvýšení hmotnosti modelu.

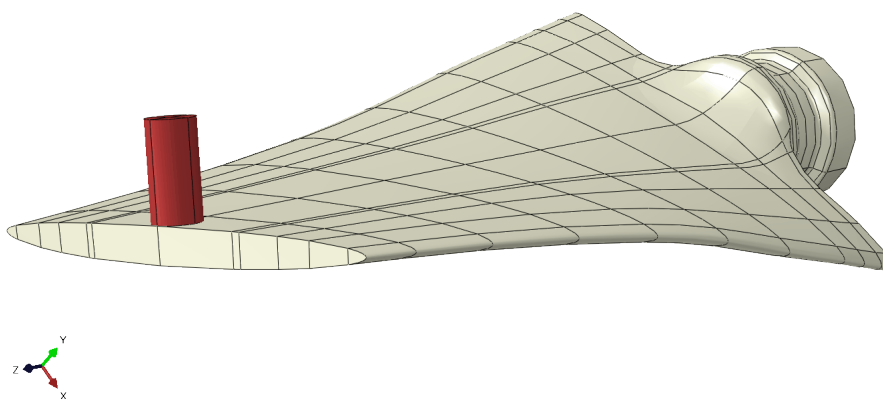
Z výsledků experimentu byl dále model upraven, aby odpovídal reálné skladbě potahu dodaných lopatek. V kořeni byla přerušena kontinuita vláken a byla nahrazena maticí o stejné tloušťce, dále byly vyrovnány tloušťky vrstev pomocí přidání vrstvy s materiálovými parametry matrice. Tyto parametry byly odhadnuty pomocí známých hodnot epoxidové matrice.

Ve všech dalších případech zatěžování byla lopatka vetknuta v kořeni pomocí omezení stupňů volnosti na potahu. Z důvodu použití skořepinových prvků bylo omezení stupňů volnosti provedeno jak pro posunutí, tak pro rotace ve všech směrech.

Zatěžování bylo definováno pro každou úlohu zvlášť, popis jednotlivých zatížení je popsán v následujících podkapitolách.

6.2.1 Ohybová zkouška lopatky

Ohybová zkouška byla modelována jako kontaktní úloha lopatky s ocelovou tyčí. Model je zobrazen na obr. 24. Ocelová tyč byla diskretizovaná pomocí



Obrázek 24: Model ohybové zkoušky

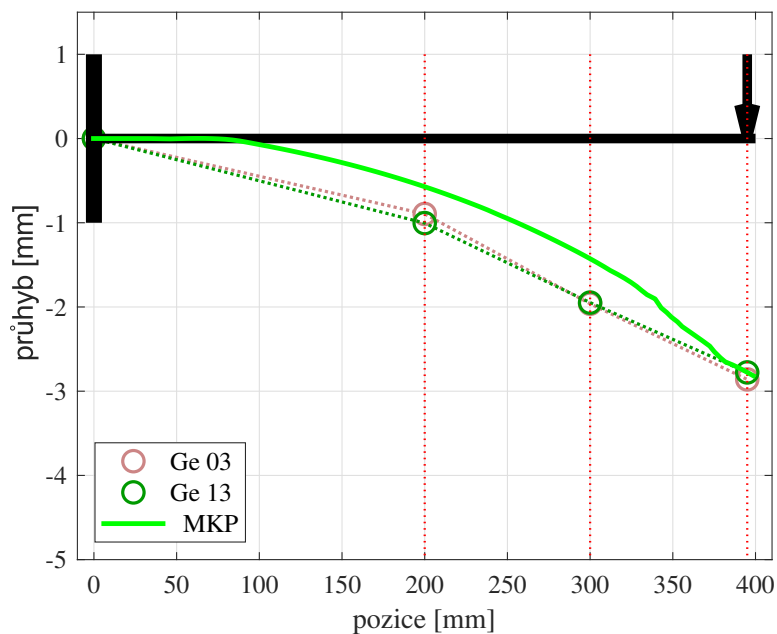
objemových hexaedrických prvků. Materiál byl zvolen homogenní.

Kontakt byl definován jako *Hard contact* se třením, kde model tření byl zvolen jako penaltový s izotropním chováním. Hodnota koeficientu tření byla zvolena jako $f = 0,3$.

Tyč byla napozicována podle experimentu, tak aby styčná hrana byla rovnoběžně s krajními body konce lopatky a hrana končila s hranou lopatky. Zatížení probíhalo pomocí konstantní síly vztažené do referenčního bodu, který byl spojen kinematickou vazbou se styčnou plochou tyče. Kinematická vazba byla svázána pouze ve směru zatížení.

Pro ocelovou tyč byla zavedena okrajová podmínka ve střednici k omezení všech posuvů kromě posuvu ve směru zatěžování.

Porovnání experimentálních výsledků s numerikou (MKP) je uvedeno v grafu na obr. 25, kde je zobrazen průhyb nosníku po jeho délce. Zatěžující síla byla zvolena podle experimentu $F_b = 200$ N. Z výsledků je patrná dobrá shoda experimentu s numerickým modelem v místě hrany lopatky. Křivka průhybu lopatky má předpokládaný tvar, kde výkyv v průhybu okolo pozice 350 bylo možné vysvětlit působením kontaktu.



Obrázek 25: Porovnání experimentálních výsledků ohybové zkoušky s numerickými

V numerickém modelu byly použity materiálové parametry získané z dílčích experimentů. Konkrétně jsou uvedeny pro potah v tab. 8 a pro izotropní materiály v tab. 9. Tato sada parametrů je dále v textu označovaná jako statické materiálové parametry.

Tabulka 8: Statické materiálové parametry laminy

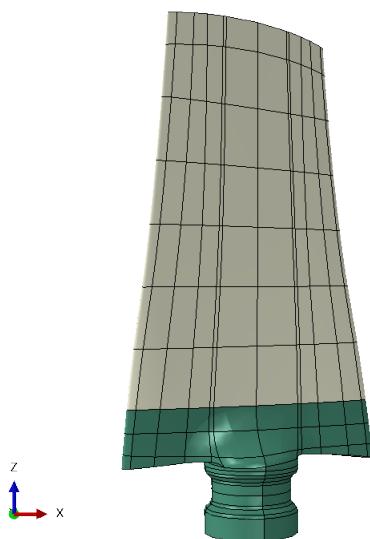
Materiál	E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	ν_{12} [-]	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	G_{23} [GPa]
GeoFly	21,00	21,00	0,05	2,50	2,20	2,20

Tabulka 9: Statické materiálové parametry izotropních materiálů

Materiál	E [GPa]	ν [-]
Ocel	200,0	0,30
Grenamat	0,5	0,05
Matrice	2,0	0,20

6.2.2 Tahová zkouška lopatky

Část lopatky, která byla v rámci experimentu tahové zkoušky zalita do pryskyřice byla v numerice modelována jako dokonale tuhé těleso bez jakýchkoliv deformací v této části. To znamená, že tuhá část se chová jako jeden celek, který se může vůči deformované části stále natáčet a posouvat. Rozdělení lopatky je znázorněno na obr. 26, kde zelená dolní část je deformovatelná a horní bílá část je definována jako tuhé těleso. Zatěžování bylo dále realizo-



Obrázek 26: Rozdělení tělesa na tuhé (šedá) a deformovatelné těleso (zelená)

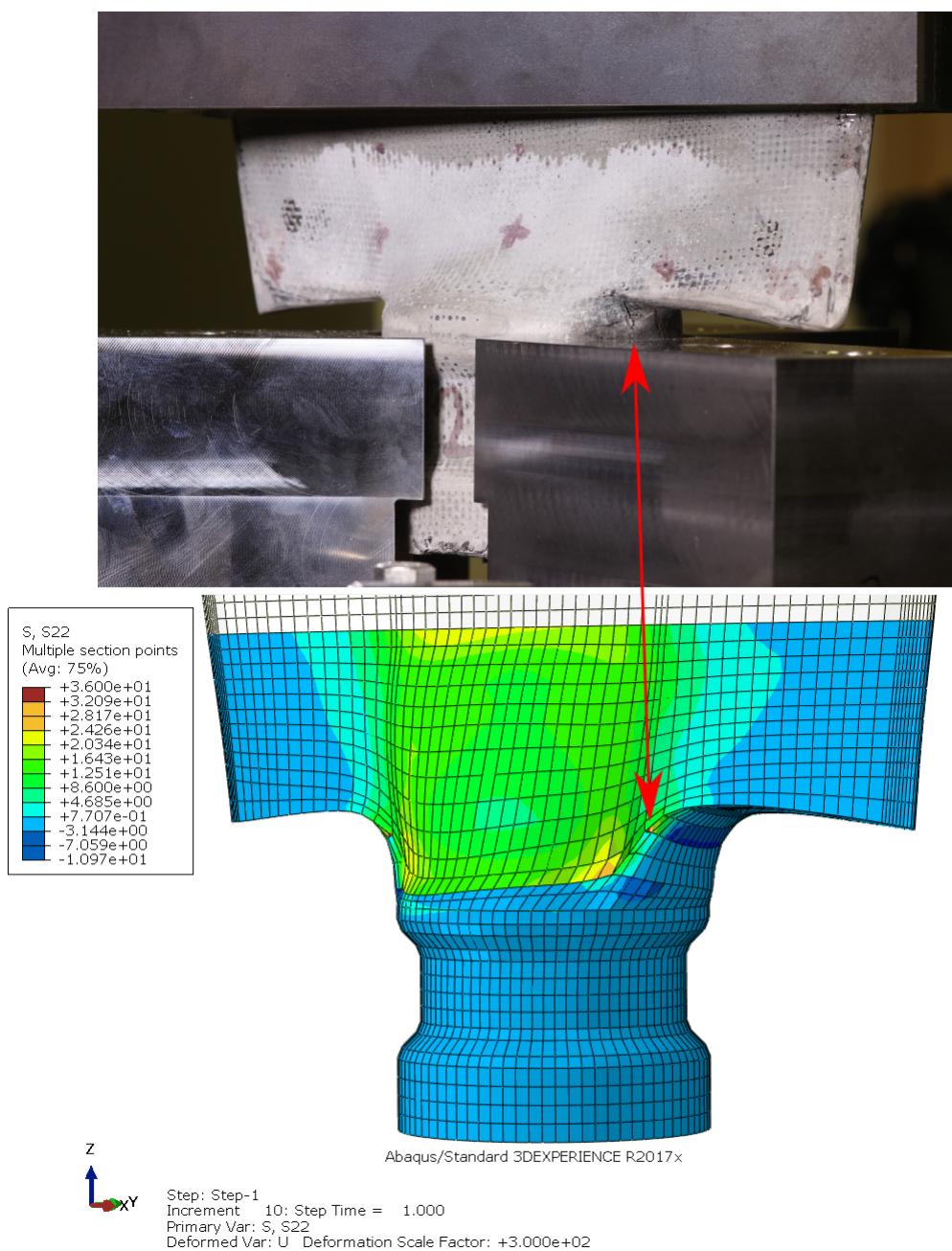
váno konstantní silou do referenčního bodu tuhého tělesa o hodnotě $F_t = 6,8$ kN. Tato hodnota odpovídá prvním známkám porušení lopatky při experimentech. Výsledek je zobrazen na obr. 27, kde napětí ve směru materiálové souřadnice 2 je uvedeno v MPa, jedná se o dominantní složku napětí. Kvůli složité geometrie nebylo v textu znázorněn jednoznačný materiálový souřadnicový systém.

Porovnáním s dostupným experimentem je vidět shoda kritického místa a prvotních známek porušení na lopatce.

6.2.3 Modální analýza lopatky

Do výchozího modelu byl přidán proces pro výpočet modální analýzy pomocí sekundárního výpočetního kroku frekvence.

Modální analýza byla vyhodnocena pro prvních 6 vlastních frekvencí v



Obrázek 27: Porovnání kritického místa numerické a experimentální tahové zkoušky lopatky

rozmezí 20–1750 Hz, z důvodu limitů naměřených dat z experimentů a nemožnosti vyhodnotit vyšší frekvence.

Jako řešič byl použit Lanczos implementovaný přímo v prostředí Aba-

qus. Implementace řešiče vlastních hodnot Lancos hledá extrémy vlastních hodnot a odpovídajících vlastních vektorů řídce symetrického zobecněného problému. Více k implementaci a teorii Lancosova algoritmu pro vlastní hodnoty je možné najít v následující literatuře [24] a modifikovaný algoritmus *A shifted block lanczos algorithm* v [27].

Výstupem numerické modální analýzy bylo nalazení materiálových parametrů vzhledem k naměřeným experimentálním hodnotám. Tento postup byl zvolen z důvodu nesourodých výsledků mezi experimentem a numerickými výsledky při použití statických materiálových parametrů. Takto získané hodnoty byly použity k získání rámcové představy k budoucímu ověření. Modální analýzou numerického modelu se v rámci projektu zabývá zpráva [17].

Materiálové parametry, které odpovídají experimentům modální analýzy byly hledány pomocí parametrické optimalizace. Optimalizační parametry byly vybrány pouze pro materiály kompozitu a jádra. Pro kompozit byl optimalizován Youngův modul $E_{comp} = E_{11} = E_{22}$, smykové moduly G_{12} a $G_{13} = G_{23}$. Pro materiál jádra (grenamat) byl optimalizován pouze Youngův modul E_{gren} . Těmto materiálům byly nastaveny dolní a horní meze, které jsou uvedeny v tab. 10 Meze byly odhadnuty podle předem vypočtených

Tabulka 10: Omezení a počáteční hodnoty optimalizačních parametrů

Jméno	Dolní mez [GPa]	Počáteční hodnota [GPa]	Horní mez [GPa]
E_{comp}	19,00	65,00	95,00
G_{12}	1,50	8,00	15,00
G_{23}	1,50	6,50	15,00
E_{gren}	0,05	0,50	1,50

iterací, kde bylo sledováno chování vlastních frekvencí. Dále byla nastavena omezující podmínka smykových modulů grenamatu ve tvaru $G_{12} > 1,1 \cdot G_{23}$. Další materiálové parametry byly ponechány beze změny z důvodu použití ověřených materiálů, jako je konstrukční ocel a hustoty optimalizovaných materiálů byly ponechány z důvodu zachování hmotnosti lopatky.

Pro parametrickou optimalizaci úlohy byl použit software *Isight Design Gateway*. Úloha byla modelována pomocí smyčky se vstupem optimalizačních parametrů, které jsou předány do skriptu k přepsání hodnot v modelu a spuštění výpočtu v řešiči Abaqus. Výstupem z řešiče bylo prvních 5 vlastních frekvencí, tyto hodnoty byly dále předány k optimalizaci, kde cílové hodnoty byly nastaveny podle průměru výsledků z experimentu volně uložených lopatek č.13–č.16 (viz tab. 4). Optimalizační proces byl nastaven jako evoluční algoritmus implementovaný v prostředí Isight. Jedná se o efektivní algorit-

mus pro konstrukční problémy s nízkým počtem proměnných. Algoritmus funguje na mutaci předchozí iterace přidáním náhodné hodnoty k optimalizačním parametrům. Tato hodnota je řízena normálním rozdělením. [8]

Optimalizace byla v první iteraci spuštěna z konfigurace se statickými materiálovými parametry. Z důvodu ověření a zpřesnění výsledků byla optimalizace opakována s počátečními hodnotami nastavenými podle tab. 10. Výstupem optimalizace jsou materiálové parametry uvedené pro potah v tab. 11 a pro izotropní materiály v tab. 12. Dále bylo zkontrolováno, že při

Tabulka 11: Dynamické materiálové parametry laminy

Jméno	E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	ν_{12} [-]	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	G_{23} [GPa]	ρ [kg.m ⁻³]
GeoFly	69,560	69,560	0,05	11,510	1,640	1,640	1680,0

Tabulka 12: Dynamické materiálové parametry izotropních materiálů

Jméno	E [GPa]	ν [-]	ρ [kg.m ⁻³]
Ocel	200,000	0,30	7850,0
Grenamat	0,906	0,05	570,0
Matrice	2,000	0,20	1100,0

změně vstupních parametrů nedochází k prohození vlastních tvarů pro různé frekvence.

Výsledky modální analýzy s použitím statických a dynamických materiálových parametrů pro volnou lopatku jsou uvedeny v tab. 13 a pro vetknutou lopatku v tab. 14.

Z obdržených výsledků je patrné, že optimalizované dynamické materiálové parametry odpovídají díky optimalizaci vlastním frekvencím pro volnou lopatku, téměř dokonale. Pro použití stejných parametrů na vetknutou

Tabulka 13: Hodnoty vlastních frekvencí volných lopatek

Metoda	Vlastní frekvence [Hz]					
	Tvar 1	Tvar 2	Tvar 3	Tvar 4	Tvar 5	Tvar 6
Experiment	416,25	585,75	911,25	1130,25	1584,00	–
Statické mat. par.	253,80	325,94	568,11	620,28	1030,20	1128,00
Dynamické mat. par.	430,68	602,99	908,70	1102,40	1581,20	1748,80

Tabulka 14: Hodnoty vlastních frekvencí vetknutých lopatek

Metoda	Vlastní frekvence [Hz]					
	Tvar 1	Tvar 2	Tvar 3	Tvar 4	Tvar 5	Tvar 6
Experiment	114,00	342,00	520,00	801,00	1124,00	1428,00
Statické mat. par.	80,74	167,19	224,51	365,44	499,71	804,47
Dynamické mat. par.	129,69	256,94	401,89	597,26	885,40	1282,40

lopatku již byly obdrženy horší výsledky. Dynamické materiálové parametry jsou oproti statickým materiálovým parametrům pro kompozit přibližně trojnásobné a u materiálu grenamat se jedná o téměř dvojnásobné navýšení tuhosti. Tyto hodnoty jsou pouze orientační a nemají fyzikální podklad.

7 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá vyšetřením statické pevnosti kompozitové lopatky axiálního ventilátoru za ztížených provozních podmínek.

V první části práce byla provedena rešerše ventilátorů a vybraných používaných odolných materiálů v lopatkových strojích. Dále byla popsána problematika dosavadního řešení v rámci projektu, na které bylo navázáno v této práci.

V experimentální části této práce byla provedena rešerše dostupných experimentů modální analýzy lopatky a tahové zkoušky dvoukořenu. Dále byla provedena statická tahová zkouška lopatky, kde byla úspěšně ověřena navržená metodika zkoušky a bylo zjištěno dosavadní kritické místo a případné nedostatky dodané lopatky. Z důvodu nedoladěné technologie výroby nebylo možné lopatku vyhodnotit z hlediska bezpečnosti jako vyhovující. V rámci experimentů byla navržena experimentální ohybová zkouška. Zde byla lopatka zatěžována pouze do nedestruktivního stavu, kde byly pozorovány konzistentní výsledky měřených lopatek jiných generací. Experimenty byly dále rozšířeny o dodatečné zkoušky pro nalezení parametrů numerického modelu, konkrétně tahové zkoušky potahu, tlakové zkoušky vermikulitu a měření tloušťky potahu po celé lopatce.

Numerický model byl v první části laděn pro model dvoukořenu. Jednalo se o zkušební těleso na kterém bylo provedeno odladění materiálových parametrů a způsobu modelování. Jako vyhodnocení bylo provedeno porovnání kritického místa numerického modelu s experimentem, které bylo identické. Dále byla modelována kompozitní lopatka, kde bylo provedeno porovnání s dostupnými experimenty. Pro ohybovou zkoušku byl numerický model lopatky validován porovnáním hodnot průhybu pro nízké hodnoty zatěžování numerického modelu a experimentu. V případě tahové zkoušky bylo z důvodu nedoladěné technologie výroby lopatky možné porovnat pouze pozici kritického místa, kde byla pozorována inicializace trhliny. Toto místo bylo totožné s pozorovaným kritickým místem v numerickém modelu. Pro úlohu modální analýzy nebylo možné dosáhnout shody numerických a experimentálních výsledků. Z tohoto důvodu byla provedena parametrická optimalizace vybraných materiálových parametrů pro získání rámcových hodnot dynamické zkoušky. Experimentální ověření a možné sjednocení parametrů bude řešeno v dalších etapách zmíněného projektu.

Použitá literatura

- [1] Dassault Systemés Corpl. *Abaqus 6.14 Documentation*. 2014.
- [2] G. V. Chilingar T. F. Yen D. Kim H.-T. Lai. *Geopolymer formation and its unique properties*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00254-006-0308-z>. Lis. 2006.
- [3] G. W. Ehrenstein. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia, 2009.
- [4] Martaus F. “Kompozity s geopolymerní maticí”. In: *VZLÚ 27* (2016).
- [5] Davidovits J. *Reinforced Geopolymer Composites: A critical review*. <https://www.materialstoday.com/polymers-soft-materials/features/reinforced-geopolymer-composites-a-critical-review/>. Květ. 2016.
- [6] Kuta J. *Instalace zkušebních lopatek do provozu se ztíženými podmínkami*. Technická zpráva, TV/Z-340-006/2021. Milevsko, Česká Republika: ZVVZ Machienery a.s., říj. 2021.
- [7] Kuta J. *Konstrukční a přípravné činnosti pro zkoušky zkušebních lopatek ve ztížených podmínkách*. Technická zpráva, TV/Z-340-002/2021. Milevsko, Česká Republika: ZVVZ Machienery a.s., čvn. 2021.
- [8] Tvrđík J. *Evoluční algoritmy*. Ostravská univerzita, 2004.
- [9] Čermák J. *Ventilátory*. SNTL, 1974.
- [10] Škorpík J. *Lopátkové stroje*. <https://www.transformacni-technologie.cz/>.
- [11] Kuta J. Úradník K. *Současné typy lopatek určené pro ztížené podmínky*. Technická zpráva, TV/Z-003-03/2020. Milevsko, Česká Republika: ZVVZ Machienery a.s., ún. 2020.
- [12] A. R. Bušel K. A. Ušakov I. V. Brusilovskij. *Aerodynamika osových ventilátorů a jejich konstrukční prvky*. SNTL, 1962.
- [13] Krystek J. Kroft R. *Experimentální modální analýza krátkých sendvičových nosníků*. Technická zpráva, NTIS-VP3-0005-2021. Plzeň, Česká Republika: Západočeská univerzita, zář. 2021.
- [14] Krystek J. Kroft R. *Experimentální modální analýza lopatek*. Technická zpráva, NTIS-VP3-0013-2021. Plzeň, Česká Republika: Západočeská univerzita, pros. 2021.
- [15] Mandys T. Horák L. Krystek J. *Statická pevnost lopatky*. Technická zpráva, NTIS-VP3-0016-2021. Plzeň, Česká Republika: Západočeská univerzita, pros. 2021.

- [16] Laš V. Krystek J. *Ohybové zkoušky sendvičových vzorků*. Technická zpráva, NTIS-VP3-0002-2021. Plzeň, Česká Republika: Západočeská univerzita, dub. 2021.
- [17] Laš V. Krystek J. Horák L. *MKP model kompozitní lopatky - modální analýza*. Technická zpráva, NTIS-VP3-0015-2021. Plzeň, Česká Republika: Západočeská univerzita, pros. 2021.
- [18] Laš V. Krystek J. Roman K. *Stanovení modulu pružnosti vermikulitu na základě modální analýzy*. Technická zpráva, NTIS-VP3-0010-2020. Plzeň, Česká Republika: Západočeská univerzita, srp. 2020.
- [19] Mandys T. Krystek J. *Přípravek pro dynamické zkoušky lopatek*. Technická zpráva, NTIS-VP3-0011-2021. Plzeň, Česká Republika: Západočeská univerzita, pros. 2021.
- [20] Mandys T. Krystek J. *Přípravek pro statické zkoušky lopatek*. Technická zpráva, NTIS-VP3-0012-2021. Plzeň, Česká Republika: Západočeská univerzita, pros. 2021.
- [21] Pompe V. Hájková P. Krystek J. Laš V. “Tensile and bending test of carbon/epoxy/ and carbon/geopolymer composites after temperature conditioning”. In: *MATEC Web of Conferences 157, 05014 1* (2018).
- [22] Kučera L. “Únava kompozitní lopatky dmyhadla”. Dipl. pr. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2020.
- [23] A. Ross D. W. Radford P. R. Jackson T. A. Parthasarathy. “Use of interphase in geopolymer matrix composites for improved toughness”. In: *Ceramics International* (lis. 2018).
- [24] B. N. Parlett. *The symmetric Eigenvalue Problem*. Prentice-Hall, 1980.
- [25] Vrba Z. Pompe V. *Lopatka D1250*. Technická zpráva, KNVR-2021/04. Odolena Voda, Česká Republika: Woodcomp S.r.o., dub. 2021.
- [26] Vrba Z. Pompe V. Křemen M. *Zkoušky vytržení paty lopatky*. Technická zpráva, KNVR-2021/02. Odolena Voda, Česká Republika: Woodcomp S.r.o., dub. 2021.
- [27] H. D. Simon R. G. Grimes J. G. Lewis. “A shifted block lanczos algorithm for solving sparse symmetric generalized eigenproblems”. In: *SIAM journal on Matrix Analysis and Applications* (1994).
- [28] Míšek T. “Vývoj ultra dlouhé lopatky 1375 mm Doosan Škoda Power pro kondenzační parní turbíny”. In: *Technický týdeník 10* (čvc. 2014).
- [29] Laš V. *Mechanika kompozitní materiálů*. Západočeská univerzita, 2008. ISBN: 978-80-7043-698-9.

- [30] Pompe V. *Odborná zpráva o řešení projektu za rok 2020*. Technická zpráva, KNVR-2020/16. Odolena Voda, Česká Republika: Woodcomp S.r.o., led. 2020.
- [31] Pompe V. *Odborná zpráva o řešení projektu za rok 2021*. Technická zpráva, KNVR-2022/01. Odolena Voda, Česká Republika: Woodcomp S.r.o., led. 2022.
- [32] Pompe V. *Zadání pro přípravu zkoušky vytržení lopatky*. Technická zpráva, KNVR-2021/05. Odolena Voda, Česká Republika: Woodcomp S.r.o., květ. 2021.
- [33] Pompe V. *Zkušební těleso D83*. Technická zpráva, KNVR-2020/14. Odolena Voda, Česká Republika: Woodcomp S.r.o., zář. 2020.
- [34] R. D. Lama V. S. Vutukuri. *Environmental Engineering in Mines*. Cambridge University Press, 1986.