

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
Katedra mechaniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Numerický model sjezdové lyže
s dřevěným jádrem a vrstvou
laminátu**

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:

Podpis autora:

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá experimentální a numerickou analýzou mechanického chování lepené struktury sjezdové lyže firmy SPORTEN s obchodním označením IRIDIUM. Práce obsahuje řešerši v oblasti materiálové skladby (se zaměřením na dřevo, plasty a lamináty) a modelování sjezdových lyží. Za účelem určení elastických konstant byly provedeny statické zkoušky tahem a ohybem na jejichž základě byly pomocí programu MATLAB a mloc určeny žádané veličiny. Dalším bodem bylo zhotovení zjednodušeného modelu struktury lyže s použitím určených materiálových charakteristik, k němu příslušného konečno-prvkového numerického modelu v softwaru MSC.Marc a provedení modální analýzy za účelem zjištění prvních pěti vlastních frekvencí. V závěru byla provedena optimalizace skladby potahů z textilního kompozitu zjednodušeného modelu lyže. Hledaným parametrem byla kombinace tloušťky a natočení jednotlivých vrstev textilního kompozitu s cílem minimalizovat hmotnost lyže a maximalizovat tuhost lyže v krutu. Analýza byla provedena metodou konečných prvků v systému MSC.Marc, optimalizace byla řízena softwarem OptiSLang a pomocné výpočty probíhaly v prostředí MATLAB.

Klíčová slova: sjezdová lyže, materiálové charakteristiky, dřevo, textilní kompozit, zkouška tahem, zkouška ohybem, modální analýza, numerický model, optimalizace

Abstract

The aim of this master thesis is an experimental and numerical analysis of mechanical behaviour of a bonded structure of the IRIDIUM brand downhill ski produced by the ski manufacturer SPORTEN in the Czech Republic. This work includes research in the field of material composition (with a focus on wood, plastics and laminated composites) and a modelling of the skis. In order to determine the elastic constants, static bending and tensile tests were carried out; the required quantities were determined using MATLAB and mloc software. The next steps were to create a simplified model of a structure of the ski using obtained material characteristics, to create the corresponding numerical finite element model in MSC.Marc system, and to carry out a modal analysis in order to determine the first five natural frequencies. Essentially, an optimization of the composition of textile composite skins of the ski model was performed, where the desired parameter was a combination of the thickness and orientation of the individual layers within the textile composite skins. The goal was to minimize the weight of the ski while simultaneously maximizing its torsional stiffness. The analysis was performed by the finite element method in MSC.Marc system, the optimization was controlled by OptiSLang software, and the subsidiary calculations were conducted in MATLAB.

Keywords: downhill ski, material characteristics, wood, textile composite, tensile test, bending test, modal analysis, numerical model, optimization

Poděkování

Velice ráda bych poděkovala Ing. Robertu Zemčíkovi, Ph.D., za užitečné rady a četné konzultace při zpracování mé diplomové práce, a panu Ing. Michalovi Malinovi za cenné informace a poskytnuté materiály pro účel této práce. Dále bych chtěla vyjádřit své děkuji panu Ing. Janu Krystkovi, Ph.D., Ing. Lubošovi Smolíkovi a Ing. Lukášovi Bekovi za pomoc při přípravě jednotlivých vzorků materiálů a při realizování experimentálních měření. V neposlední řadě bych ráda ocenila vstřícný přístup všech členů katedry mechaniky během celého studia.

Obsah

1	Úvod	10
2	Popis současného stavu	13
2.1	Problematická témata	13
2.2	Složení a design sjezdové lyže	14
2.3	Model lyže ve 3D v praxi	16
3	Používané materiály	19
3.1	Mechanické vlastnosti anizotropních materiálů	19
3.2	Dřevo	21
3.2.1	Mechanické vlastnosti dřeva	22
3.2.2	Jasan	24
3.2.3	Bříza	24
3.2.4	Topol	24
3.2.5	Hikora bílý ořech	25
3.2.6	Buk	25
3.2.7	Javor	25
3.3	Plasty	26
3.3.1	Polyethylen (PE)	26
3.3.2	ABS	27
3.3.3	Polyamid	27
3.3.4	Další části konstrukce	27
3.4	Kompozity	28
3.4.1	Skelný laminát	28
3.4.2	Kevlarový laminát	28
3.4.3	Uhlíkový laminát	28
3.5	Kovy	29
3.5.1	Slitiny hliníku	29
3.5.2	Ocel	29
4	Experimentální měření	32
4.1	Použité materiály v lyži IRIDIUM	32
4.2	Topolové dřevo	37
4.2.1	Zkouška tahem a ohybem	37
4.3	Bukové dřevo	38
4.3.1	Zkouška tahem a ohybem	38
4.4	Textilní kompozit, fólie a skluznice	39

4.4.1	Zkouška tahem	39
4.5	Epoxidové lepidlo	41
5	Určení materiálových charakteristik	42
5.1	Modul pružnosti v tahu	42
5.2	Poissonovo číslo	45
5.3	Modul pružnosti ve smyku	46
5.4	Materiálové charakteristiky daných materiálů	47
6	Zjednodušený model části sjezdové lyže	48
6.1	Výroba zkušebních vzorků	48
6.2	Modální analýza dřevěného jádra	53
6.3	Modální analýza vyrobeného vzorku	56
7	Optimalizace numerického modelu lyže	60
7.1	Numerický model lyže	60
7.2	Optimalizace	61
7.2.1	Výsledky optimalizace	62
8	Závěr	65
	Přílohy	70

Seznam obrázků

1	Průřez plastovou lyží Rossignol ROC 550. [31]	11
2	Bokorys a nárys lyže ukazující její klenutí a vykrojení [12].	15
3	Průřezy lyžemi Elan [10].	16
4	Řez konečno-prvkovým modelem [12].	17
5	Celkový pohled na lyži [12].	18
6	Kompletní model lyže pro simulaci carvingového oblouku [12].	18
7	Souřadnicový systém dřeva [14].	21
8	Nákres původní hrany [6].	29
9	Nákres hrany se zahnutým čelem [6].	30
10	Nákres zámkové hrany [6].	30
11	Detail geometrie hran.	30
12	Vložení hran do lyží značky SPORTEN.	31
13	Lyže IRIDIUM [32].	32
14	Tahová zkouška topolu.	37
15	Ohybová zkouška topolu.	38
16	Tahová zkouška buku.	38
17	Ohybová zkouška buku.	39
18	Tahová zkouška textilního kompozitu.	40
19	Tahová zkouška fólie.	40
20	Tahová zkouška skluznice.	40
21	Tahová zkouška vzorku „kompozit-lepidlo-kompozit“.	41
22	Závislost napětí na deformaci pro topolové dřevo.	43
23	Závislost napětí na deformaci pro bukové dřevo.	43
24	Závislost napětí na deformaci vzorku textilního kompozitu.	44
25	Závislost napětí na deformaci vzorku skluznice.	44
26	Závislost napětí na deformaci vzorku fólie.	45
27	Korelace digitálního obrazu v softwaru mloc.	46
28	Materiály, jež byly ve struktuře vzorku zanedbány.	49
29	Materiály použité při výrobě vzorku zjednodušené části lyže.	50
30	Připravený vzorek zjednodušené části lyže před vytvrzením.	51
31	Hotový vzorek po vytvrzení zjednodušené části lyže.	52
32	Schéma sítě vzorku pro modální analýzu.	53
33	Numerický model dřevěného jádra lyže.	54
34	První čtyři vlastní tvary kmitu dřevěného jádra.	54
35	První čtyři vlastní tvary kmitu numerického modelu dřevěného jádra.	55

36	Průběh modální analýzy.	56
37	Parametrický model tvořený prvky hex8.	58
38	Parametrický model tvořený kombinací prvků hex8 a quad4.	58
39	Numerický model lyže.	60
40	Okrajové podmínky pro zkoušku krutem.	61
41	Graf aproximované chybové funkce.	63
42	Zkouška krutem s hodnotami posunutí v ose y při zadání výsledků optimalizace (deformace zvětšena 20×).	64

Seznam tabulek

1	Základní údaje zaslaných materiálů lyže IRIDIUM.	34
2	Rozměry vzorků topolového dřeva.	35
3	Rozměry vzorků bukového dřeva.	35
4	Rozměry vzorků textilního kompozitu.	36
5	Rozměry vzorků fólie.	36
6	Rozměry vzorků skluznice.	36
7	Experimentálně zjištěné materiálové charakteristiky částí lyže.	47
8	Porovnání prvních pěti vlastních frekvencí [Hz] dřevěného jádra a numerického modelu.	55
9	Prvních pět vlastních frekvencí [Hz] vyrobených vzorků a je- jich zprůměrovaná hodnota.	56
10	Dourčené materiálové charakteristiky.	59
11	Prvních pět vlastních frekvencí [Hz] jednotlivých modelů a procentuální odchylky od skutečného modelu.	59
12	Porovnání referenčního stavu a optimalizovaného stavu. . . .	64
13	Materiálové charakteristiky převzaté z literatury.	71

1 Úvod

Lyže patří mezi nejstarší dopravní prostředky člověka na světě. Původně umožňovaly ohoblované dřevěné trámy pouze přesouvání se z místa na místo, v průběhu 20. století se ale lyžování stává oblíbeným sportem a vyhledávanou rekreační aktivitou. Zásahu za velký pokrok ve vývoji tohoto odvětví nese Nor Sondre Norheim, jenž roku 1870 navrhl první moderní lyže telemarkového typu.

Druhá polovina 19. století a začátek století 20tého se nese ve jménu celodřevěných lyží vyráběných převážně z jasanového dřeva. Ve dvacátých letech přichází na trh novinka, a to lyže ze speciálního houževnatého hikorového dřeva z ořechovce bílého dováženého ze Severní Ameriky. Výroba zaznamenává v polovině třicátých let další pokrok, a to v podobě tzv. „lepené lyže“, kdy střed je odlehčený z měkkého dřeva a horní plát a skluznice z dřeva tvrdého. Lepení vyžaduje lis a formu, díky čemuž odpadáva potřeba napařování a ohýbaní lyže do daného tvaru. S příchodem dokonalejších lepidel, s jejichž pomocí je možné již lepit hranu vcelku (ne ji lepit po kouskách), hliníku, dále umělohmotných skluznic a tkanin ze skelných vláken prosycených vytvrzenou pryskyřicí (fiberglass), se stává lyže výrobkem kompozitním a signalizuje konec celodřevěných lyží.

Roku 1955 se přechází k extrudovaným polyethylenovým skluznicím, které od sedmdesátých let nahrazují skluznice sintrované. Tehdejší lyže jsou dlouhé, tvrdé, skoro nekrojené a s rádiusy okolo 60 m, ale konstrukčním a materiálovým principem srovnatelné. Rozdíl je ještě patrný v absenci tlumících materiálů a většinovým zastoupením polyuretanových jader. Zdá se, že dřevo je definitivně překonáno. Na obr. 1 je znázorněn průřez lyží Rossignol ROC 550 s polyuretanovým jádrem.

Od devadesátých let se ale renomovaní výrobci vracejí zpět ke klasickému a osvědčenému dřevu a jádra lyží jsou nejčastěji realizována v podobě kombinace dřeva měkkého a tvrdého [31].

Výroba lyží je v dnešní době realizována v zásadě na základě zkušeností samotných výrobců s danými materiály a experimentů na zkušebních vzorcích. Komerční výpočtové softwary se víceméně nevyužívají, poněvadž problém nastává ve chvíli, kdy je potřeba zadat materiálové charakteristiky všech použitých materiálů. Ty často nejsou známy, nebo se v průběhu výroby materiál ještě upravuje a nelze zajistit, aby jeho vlastnosti byly v průběhu celé délky lyže stejné.



Obrázek 1: Průřez plastovou lyží Rossignol ROC 550. [31]

Tato práce si tedy klade za cíl provést:

- rešerši v oblasti modelování především sjezdových lyží a dílčích materiálů (lamináty, dřevo, plasty),
- experimentální testy materiálů použitých ve sjezdové lyži,
- určení materiálových charakteristik použitých materiálů,
- vytvoření struktury a příslušného numerického modelu sjezdové lyže,
- optimalizaci skladby struktury sjezdové lyže.

Poslední čtyři zmíněné body probíhaly na základě spolupráce s tuzemským výrobcem lyží SPORTEN, a to specificky pro materiály používané v lyži s obchodním označením IRIDIUM.

Diplomová práce je rozčleněna do sedmi kapitol. Nejprve jsou nastíněny dosud nezodpovězené problémy a otázky v tomto odvětví s případnými řešeními a je zde popsán současný stav materiálové skladby lyží. V neposlední řadě je zde ukázána jedna z variant způsobu vytvoření 3D modelu lyže v praxi. Další kapitola se zabývá obecnou teorií kompozitních materiálů a popisu výhod a nevýhod dříve i v současnosti používaných materiálů.

Kapitola čtvrtá je věnována experimentálním zkouškám, kde je zdokumentována realizace mechanických zkoušek na jednotlivých vzorcích materiálů. Kapitola pátá se zabývá určením materiálových charakteristik jednotlivých segmentů lyže pomocí programu MATLAB a softwaru mloc na základě provedených mechanických zkoušek. Kapitola šest dokumentuje popis výroby zjednodušeného vzorku části lyže, odpovídajícího numerického modelu a obsahuje porovnání vlastních frekvencí obou modelů. Sedmá kapitola zahrnuje vlastní optimalizaci skladby textilního kompozitu lyže. Je zde popsána tvorba samotného modelu lyže, algoritmus optimalizace a dosažené výsledky.

Součástí práce je tištěná příloha a přiložený CD-ROM s vytvořenými modely a zdrojovými kódy zpracovaných programů ve spustitelné podobě.

2 Popis současného stavu

2.1 Problematická témata

Sjezdové lyžování je v současnosti vyhledávaným a oblíbeným sportem, jemuž se jenom v České republice věnuje přes jeden milion obyvatel [17], a ačkoliv by se mohlo zdát, že se už nemá kam dále posouvat, skýtá stále mnoho neobjasněných otázek. Jednou z nich je například mechanismus skluzu lyže po sjezdovce. Existuje několik hypotéz [34] vysvětlujících snižování třecí síly (koeficientu třecí síly) díky tajícímu sněhu mezi skluznicí a sněhovou pokrývkou, ale žádná z nich nebyla dokázána.

Dále byly publikovány práce [12, 13, 18] snažící se o co nejvěrohodnější nasimulování oblouku na sjezdovce, které ale vždy uvažují nespočet zjednodušení a potýkají se s problémem týkajícím se realistického ztvárnění sněhové pokrývky a specifikací sil přenášených lyžařem do lyží a vice versa závisící na typu vázání.

S příchodem nového lyžařského stylu, tzv. „carvingu“, kolem roku 1996 se začínají objevovat dosud netušené problémy. Díky vykrojenějšímu profilu lyže a tím plynulejší jízdě po hranách se při každém oblouku zvyšuje lyžařova rychlost, čímž dochází k rozkmitání lyže a její horší ovladatelnosti. Jedním z hlavních cílů výrobců v tomto odvětví je v posledních letech právě kontrola a tlumení nežádoucích vibrací.

Výrobci lyží tedy pracují na vylepšení a zdokonalení lyží v této problematické sféře. Je potřeba dosáhnout optimální torzní tuhosti lyže bez markantní změny její váhy. Jeden z návrhů byl například tlumit rušivé frekvence pomocí implementované aktivní soustavy piezoelektrických elementů, kde frekvence vhodné k útlumu byly vyhodnoceny pomocí senzorů. Bohužel se ale dospělo k závěru, že tento systém je funkční pouze při pomalých vibracích, při extrémních podmínkách, jež jsou spojeny s vibracemi rychlými, reaguje kontrolní jednotka příliš pomalu a neefektivně [1].

Novinek a inovací v tomto směru je nespočet, mimo jiné se například v nynější době vyztužují boky lyží, zapouští se vázání do lyže, pod vázání se vkládá olejový píst sloužící právě k tlumení vibrací, do struktury se přidávají vložky ze slitiny titanu a hliníku ke zvýšení torzní tuhosti lyže, zhušťuje se materiál na určitých oscilujících místech lyže atd. Pro daná zdokonalení by bylo ideální znát dostatečně podrobný popis všech použitých a popřípadě i použitelných materiálů. Každá složka, která ovlivňuje chování lyže v různých směrech, má logicky svůj jedinečný význam. Zde se ale opět

narází na problém zmíněný v úvodu práce, a to na absenci materiálových charakteristik dílčích složek lyže pro vytvoření a nasimulování modelu ve výpočtovém softwaru v dostatečně realistické formě. V praxi často samotné použití materiálů a jejich poměrů vychází ze zkušeností výrobců a zkušebních vzorků lyží.

2.2 Složení a design sjezdové lyže

Výrobci přesné složení své lyže nikde neprezentují a chrání si jej jako firmní „know-how“, ale obecně lze konstatovat, že struktura lyže je tvořena z následujících částí:

- **vrchní ochranná fólie**

Vrchní ochranná fólie je tvořena z polyamidu (PA) či akrylonitril-butadienstyrenu (ABS) a dodává lyži specifický design a ochranu.

- **jádro**

Jádro, jehož tloušťka se plynule mění v rámci profilu lyže, hraje důležitou roli v tlumení nežádoucích frekvencí. Skládá se nejčastěji z více různých typů dřev (slepených dohromady), polyuretanu či kombinací polyuretanu a dřeva.

- **vrstvy obepínající jádro**

Tyto vrstvy, zajišťující tuhost v ohybu a krutu, mohou být tvořeny například hliníkovým plátem ve spojení s tkaninou ze skelných vláken prosycených vytvrzenou pryskyřicí.

- **skluznice**

Skluznice poskytuje optimální skluzné vlastnosti na sněhu. Je často vyrobena z vysokohustotního polyethylenu.

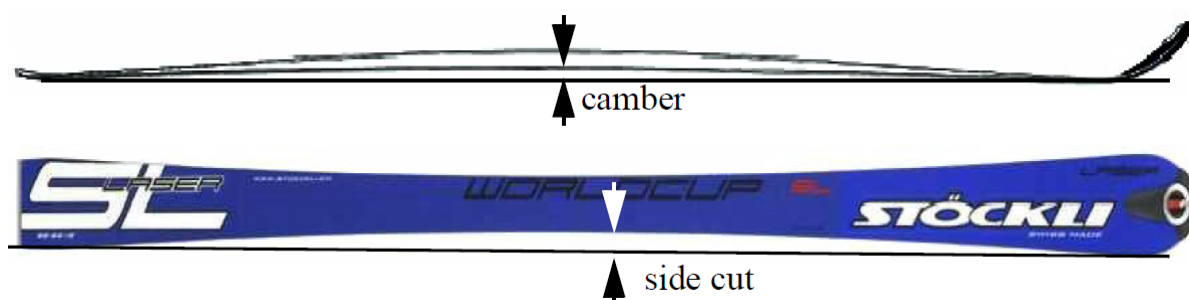
- **hrany**

Ocelové hrany jsou umístěny po stranách lyže a umožňují potřebnou kontrolu během zatáčení.

Jednotlivé vrstvy jsou slepeny nejčastěji pomocí tenké vrstvy **pryskyřicového lepidla** [15]. Výroba lyže probíhá nakladením těchto vrstev do formy a jejich následným lisováním pod tlakem za zvýšené teploty [25].

Co se týká tvaru, tak všechny lyže jsou v dnešní době již speciálně klenuty (anglický výraz *camber*). Když je lyže zatížena v prostřední sekci, klenutí přeneše tlak lyže na její patku a špičku, čímž zvýší záběr lyže právě v těchto místech a zjednoduší vyjetí oblouku.

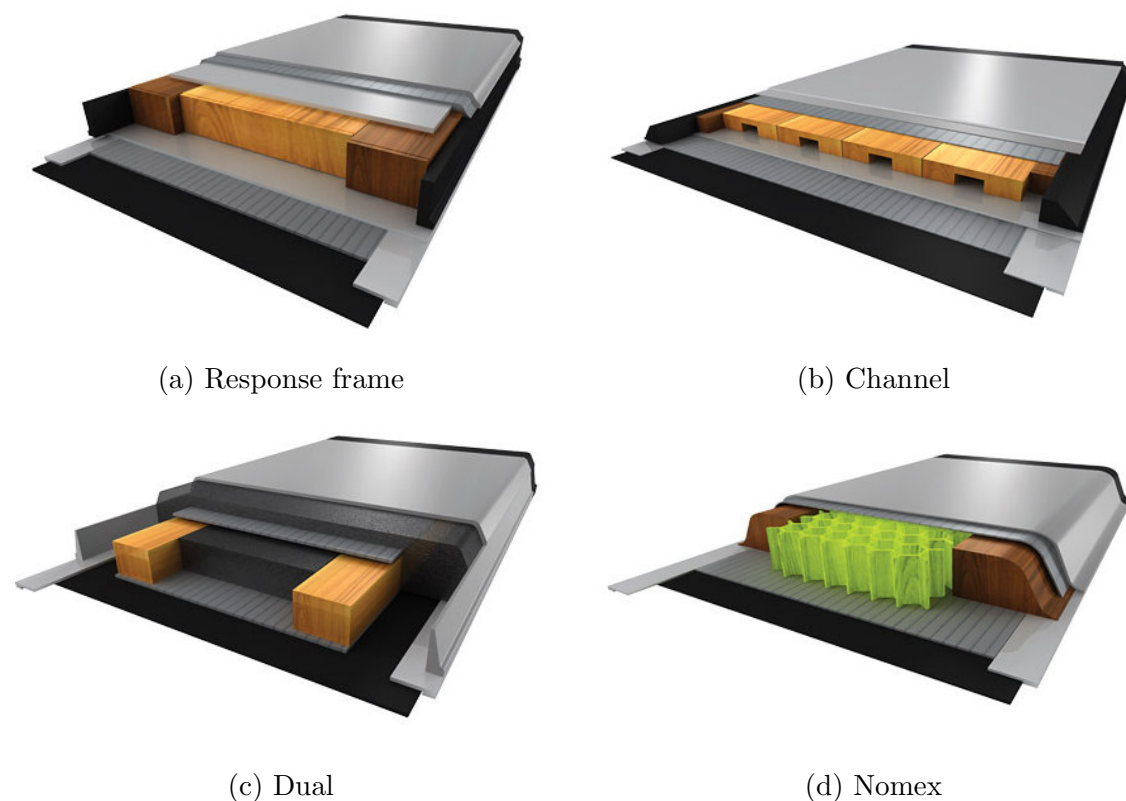
Proměnná šířka po délce lyže je pak definována vykrojením lyže (*side-cut*). V průběhu oblouku se lyže ohýbá až do momentu kontaktu střední části se sněhem. Tvar vykrojení je takový, aby odpovídal kružnici s určitým poloměrem, proto se vykrojení nazývá také poloměr oblouku, popřípadě radius. Na obr. 2 je zobrazen bokorys a nárys lyže, jenž ukazuje zmiňované klenutí a vykrojení lyže.



Obrázek 2: Bokorys a nárys lyže ukazující její klenutí a vykrojení [12].

Lyže prošla složitou cestou vývoje nejen v materiálové skladbě jako takové, ale i v použitých profilech dílčích složek, jejich kombinací a celkovým rozložením v rámci lyže. Speciální péče je pak věnována samotnému tzv. „srdci lyže“, tedy dřevěnému jádru, jehož variací tvarů, použitých typů dřev, popřípadě spojením s určitým kompozitem či jiným materiálem lze zásadně ovlivnit vlastnosti lyže.

Na obr. 3 jsou vyobrazena některá z jader lyží společnosti Elan, kde „Response frame“ je složeno z tvrdého dřeva, tvořícího rám kolem dřeva měkkého. „Channel“ sází na vzduchové kanálky po celé šířce lyže, jež pomáhají snižovat hmotnost. „Dual“ a „Nomex“ jsou potom již jádra kombinovaná s dalším materiálem, kde „Dual“ se skládá ze dvou dřevěných nosníků na vnějších hranách jádra lyže obepínající polyuretanový střed a druhý zmiňovaný se vyznačuje lehkou, ale torzně pevnou strukturou Nomex s podobou včelí plástve (voštiny) [10].



Obrázek 3: Průřezy lyžemi Elan [10].

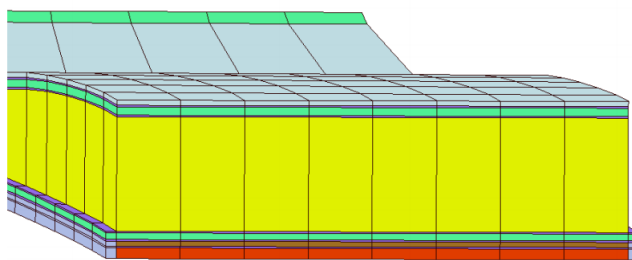
2.3 Model lyže ve 3D v praxi

Po prostudování dostupných materiálů lze konstatovat, že zhotovení dostatečně realistického modelu lyže s kompletní vnitřní strukturou zohledňující v její stavbě všechny vlivy, které na ní během výroby působí, je pracná a finančně i časově náročná procedura, která s sebou nese vždy určitý počet zjednodušení a nejistý výsledek.

Pravděpodobně se právě proto v praxi při výrobě nového typu lyže nejprve zhotoví pouze 3D předloha v CAD systému, jež musí vycházet z určitých pravidel a standardů, dle které se vyrobí hrubý celodřevěný model a po prozkoumání a dalších úpravách se již pracuje jen s testovacími vzorky. Model se tedy zhotovuje víceméně jenom pro tvarovou a designovou představu lyže.

Na základě provedené rešerše byla nalezena práce, jež si klade za cíl vytvořit realistickou simulaci konečno-prvkového modelu lyžařského vázání při namáhání v carvingovém oblouku. Autor zde podrobně zachycuje i problematiku tvorby numerického modelu lyže snažící se o jeho nejvěrnější zpracování. Následující popis zachycuje vytvoření modelu v [12].

Model je vytvořen jako laminát, kde geometrie jednotlivých vrstev je definována pomocí vykrojení lyže a postupně se měnící tloušťky po délce lyže. Dílčí složky jsou mezi sebou spojeny vrstvou lepidla. Zde nastává jeden z problémů, poněvadž tloušťka vrstvy lepidla je vysoce proměnlivá a to nejenom mezi jednotlivými kusy lyží, ale i v rámci vrstev samotných. Jako možné řešení je zde navrhováno průměrnou tloušťku odhadnout s přihlédnutím k celkové tloušťce řezu lyže nebo určit na základě několika mikroskopických měření. Obr. 4 zobrazuje řez dané struktury modelu lyže.

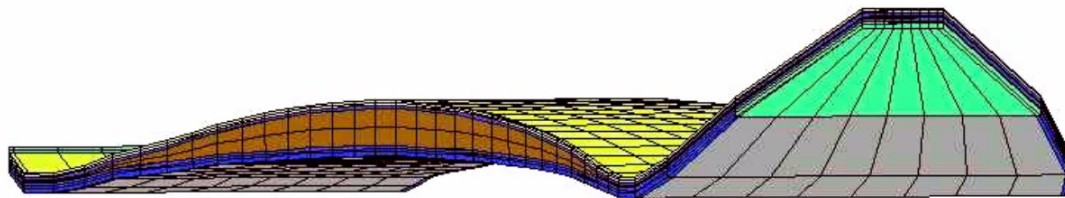


Obrázek 4: Řez konečno-prvkovým modelem [12].

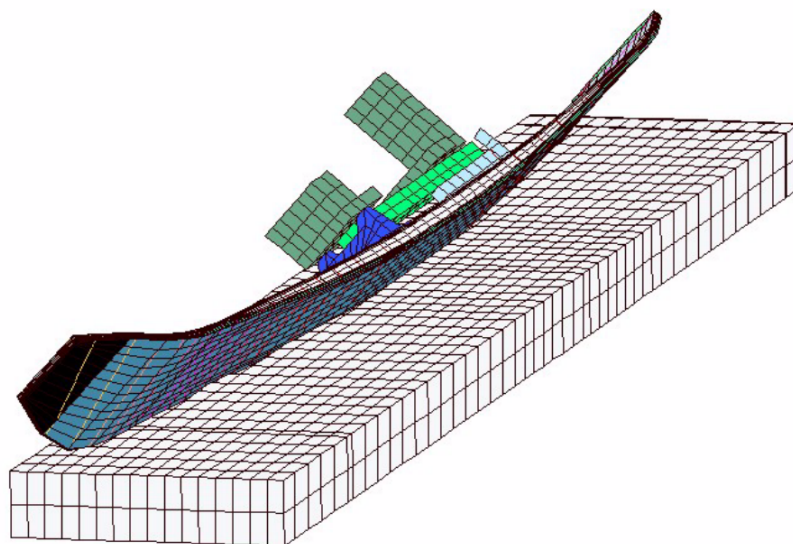
Dalším problémem v implementaci modelu lyže je reprezentace jejího klenutí. Během lisování vrstev lyže za zvýšené teploty vznikají v její struktuře vnitřní pnutí, jež po vyjmutí dílu z formy mohou způsobovat postprocesní deformace. Je tedy nemožné přesně popsat stav vnitřních napětí v lyži vzhledem k různým použitým materiálům, zvláště s uvážením, že většina lyží ještě bývá dodatečně plasticky ohýbána. Je nutné tedy podotknout, že model byl v tomto směru zjednodušen a vnitřní napětí zde nejsou brána v potaz.

V neposlední řadě vyvstává otázka, jaké konečno-prvkové elementy pro model použít, aby výsledky pevnostních a tuhostních výpočtů byly dostatečně přesné. Tvar lyže a typ deformace během carvingového oblouku vedou k použití skořepinových prvků, jež jsou vhodné pro ohybové deformace, ale jak autor uvádí, pravděpodobně vykazují méně přesné výsledky pro deformace torzní. Bylo provedeno několik výpočtů pro extrémní ohybové zatížení s modelem s typy elementů, které dovolují příčný smyk a následně se zmíněnými skořepinovými prvky, které s ním nepočítají. Test byl navíc opakován pro různé tloušťky vrstev lepidla, které jsou pravděpodobně nejnáchylnější na zmíněný smyk během ohybové zkoušky. Experimenty provedené ve zmíněné práci ukázaly, že povolení smykových deformací nevnáší do výsledků žádné zásadní změny, a proto pro ohybové zkoušky zde byly zvoleny prvky skořepinové [12].

Na obr. 5 je znázorněn celkový pohled na konečno-prvkový model lyže a obr. 6 zobrazuje kompletní model lyže včetně vázání při simulaci carvingového oblouku.



Obrázek 5: Celkový pohled na lyži [12].



Obrázek 6: Kompletní model lyže pro simulaci carvingového oblouku [12].

3 Používané materiály

Tato kapitola se věnuje obecnému popisu materiálů z mechanického hlediska a následně se již s využitím těchto informací soustředí na specifické materiály používané v lyžařském průmyslu. Speciální pozornost je věnována dřevu, ze kterého je u mnoha lyží vytvořeno jejich jádro, tzv. „srdce lyže“, jehož tloušťka markantně přesahuje tloušťky ostatních vrstev a které zásadně ovlivňuje mechanické vlastnosti lyže.

3.1 Mechanické vlastnosti anizotropních materiálů

Kompozitní materiál neboli kompozit je materiál složený ze dvou nebo více odlišných složek s různými mechanickými a chemickými vlastnostmi, které jsou odděleny rozhraním a dohromady dávají materiálu zcela nové charakteristiky. Kompozity jsou složeny z výztuže, jež je považována za pevnější a tužší část, a matrice, která je většinou poddajnější.

K základním matematickým vztahům popisující tuto problematiku, za předpokladu lineárního elastického materiálu, patří mimo jiné zobecněný Hookeův zákon, charakterizující vztah mezi napětím a deformací

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

kde $\boldsymbol{\sigma}$ je vektor napětí, \mathbf{C} je symetrická matice tuhosti materiálu a $\boldsymbol{\varepsilon}$ vektor deformace. Tuto rovnici lze vyjádřit i v inverzním tvaru

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (2)$$

kde \mathbf{S} popisuje symetrickou matici poddajnosti.

Jak matice tuhosti, tak matice poddajnosti má u anizotropního materiálu 21 nezávislých prvků, přičemž u tohoto materiálu platí zcela obecná anizotropie, tj. neexistuje ani jedna rovina symetrie elastických vlastností. V praxi se ale často vyskytují materiály, jejichž vlastnosti jsou v určitých směrech stejné a tedy počet nezávislých prvků je nižší [23]. Dále bude pozornost věnována pouze typům materiálu vyskytujícím se ve struktuře lyže.

Ortotropní materiál

Materiál je nazýván ortotropním, pokud má dvě navzájem kolmé (ortogonální) roviny symetrie elastických vlastností a existuje-li třetí, která je k oběma rovinám kolmá. Pak je i tato rovina rovinou symetrie elastických vlastností. Každým bodem ortotropního materiálu procházejí tři vzájemně kolmé hlavní směry anizotropie [23].

Matice tuhosti \mathbf{C} má v souřadnicovém systému $O(1, 2, 3)$ tvar

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Po vyjádření Hookeova zákona při použití konstant pružnosti je vzhledem k symetrii matice tuhosti (3) zřejmé, že pro popis tohoto materiálového modelu je potřeba znát devět nezávislých konstant. Těmi jsou tři moduly pružnosti v tahu v hlavních směrech anizotropie (E_1, E_2, E_3), tři moduly pružnosti ve smyku v rovinách rovnoběžných s rovinami symetrie elastických vlastností (G_{12}, G_{23}, G_{13}) a tři Poissonova čísla s indexy popisující směr normálového napětí a příslušnou deformaci v příčném směru ($\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$).

Mezi Poissonovými čísly a moduly pružnosti v tahu platí vztah

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}, \quad (4)$$

kde $i \neq j$.

Příčně izotropní materiál

Jedna rovina symetrie elastických vlastností tohoto materiálu je zároveň i rovinou izotropie, což znamená, že elastické vlastnosti v této rovině jsou ve všech směrech stejné. Pro popis tohoto materiálu je potřeba znát pět nezávislých elastických konstant ($E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$ a ν_{23}).

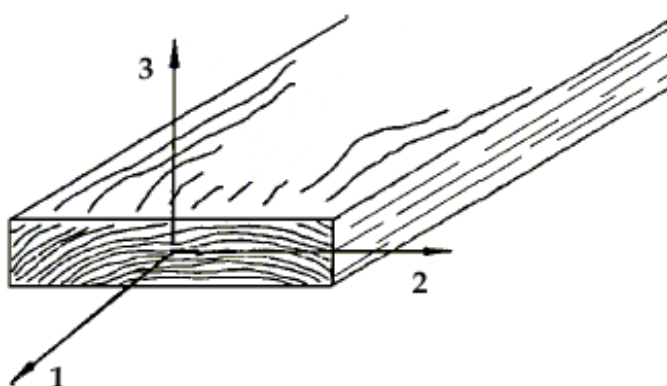
Izotropní materiál

Jestliže má materiál ve všech směrech identické vlastnosti, je považován za materiál izotropní. Matice tuhosti (poddajnosti) obsahuje tři prvky a k popsaní tohoto materiálu jsou potřeba pouze dva nezávislé parametry pružnosti, a to modul pružnosti v tahu E a Poissonův součinitel ν [23].

3.2 Dřevo

Celodřevěné lyže byly těžké, k výrobě byl zapotřebí poměrně velký kus kvalitního dřeva, lyže se těžko párovaly a dřevo se vlhkostí kroutilo. Velký technologický pokrok přinesla výroba lyže ze dvou horizontálně slepených vrstev tvořených různými typy dřev. Pro horní plát se používalo lehké měkké dřevo a pro spodní vrstvu potom dřevo tvrdé, hladké a schopné udržet hrany. V návaznosti na tuto inovaci začali výrobci experimentovat se složením lyže ještě z více částí za účelem ovlivnění mechanických vlastností lyže [6].

Při popisu mechanického chování materiálu je na dřevo nahlíženo jako na ortotropní materiál (viz kap. 3), jehož mechanické vlastnosti jsou vyjádřeny v podélném, radiálním a tečném směru. Na obr. 7 je znázorněn souřadnicový systém dřeva, kde podélná osa (osa 1) je orientována ve směru vláken, radiální (osa 3) pak popisuje směr normály k růstu letokruhům a osa tečná (osa 2) je kolmá na směr vláken a zároveň tečná k letokruhům.



Obrázek 7: Souřadnicový systém dřeva [14].

Na základě provedené rešerše bylo nalezeno několik prací [2, 3, 19] zabývajících se určováním elastických konstant dřeva, numerickou simulací tohoto materiálu při různém zatěžování a nelineárním mechanickým chováním dřeva. Práce [2] se věnovala identifikaci materiálových charakteristik rozměrnějších dřevěných těles na základě experimentu, kdy ocelový válec vnikal ve vertikálním směru do dřeva ve tvaru kvádrů. Odpovídající experiment byl zde realizován i numerickým výpočtem v konečno-prvkovém řešiči LS DYNA 3D, kdy na dřevo bylo nahlíženo jako na ortotropní kontinuum. Práce [19] obsahuje popis experimentu a jemu odpovídají numerickou simulaci odezvy dřeva s vysokou rychlostí poškození, kdy doprostřed dřevěného nosníku bylo vloženo malé výbušné zařízení. Dřevo bylo v tomto případě následně opět modelováno ve stejném programu jako v případě předchozím a na tento materiál bylo nahlíženo jako na ortotropní lineárně elastický materiál s materiálovým poškozením, které bylo popsáno pomocí speciální napěťové podmínky v místech poškození.

3.2.1 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva jsou ovlivňovány směrovou nestejnorodostí tohoto materiálu a četnými odchylkami od idealizované anatomické stavby [9]. Pro stanovení charakteristických veličin se využívají normy, jež přesně popisují metodu práce s určitým základním souborem dřeva.

1. Pružnost dřeva

Modul pružnosti [Pa], závisící např. na druhu dřeviny, vlhkosti, vadách dřeva či objemové hmotnosti, se stanovuje dle normy ČSN EN 408 pomocí přesně definované čtyřbodové zkoušky ohybu, popř. zkoušky tahem.

2. Pevnost dřeva

Dřevo je složeno hlavně z celulózy, ligninu a hemicelulóz. Krystalická vlákna celulózy plní funkci výztuhy, vlákna ligninu matrice a hemicelulózy pojiva. Celulóza vykazuje vysokou pevnost v tahu ve směru vláken a proto i dřevo má v tomto směru výrazně větší pevnost než ve směru příčném na vlákna. Tato mechanická vlastnost je ovlivněna mnoha činiteli, např. nižší pevnost vykazují materiály při vyšší teplotě (příčinou je plastifikace ligninu), pevnost je ovlivněna suky, vlnitými letokruhy či vlnitými vlákny.

(a) **Statická pevnost**

i. **Pevnost v tahu**

Pevnost v tahu [Pa] se stanovuje dle norem ČSN 49 0113 a ČSN 49 0114.

ii. **Pevnost v tlaku**

Pevnost v tlaku [Pa] ve směru vláken je výrazně nižší oproti pevnosti v tahu, zatímco v příčném směru je tlaková pevnost srovnatelná s pevností v tahu. Pevnost v tlaku se zkouší podle norem ČSN 49 0110 a ČSN 49 0112.

iii. **Pevnost ve smyku**

Pevnost ve smyku [Pa] je silně ovlivněna směrovou nestejnorodostí dřeva a největší hodnota je vykazována ve směru příčném na vlákna. Pevnost ve smyku se stanovuje podle normy ČSN 49 0118.

iv. **Pevnost v ohybu**

Dřevo vykazuje ve směru vláken velmi vysokou pevnost v ohybu [Pa], ve směru příčném pak nízkou. Pevnost v ohybu je zkoušena podle normy ČSN 49 0115.

(b) **Dynamická pevnost**

i. **Houževnatost (rázová pevnost)**

Obecně lze konstatovat, že dřevo je proti tomuto namáhání odolné, zvláště obsahuje-li dlouhá a zprohýbaná vlákna. Houževnatost [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$] se určuje dle normy ČSN 49 0117.

3. **Tvrдость dřeva**

Zásluhou nehomogenity stavby tohoto materiálu nemá dřevo ve všech směrech a místech stejnou tvrdost [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]. Je možné říci, že letní část letokruhu je tvrdší než jarní a že dřevo s větší hustotou je tvrdší než dřevo s hustotou nižší.

4. **Štípatelnost dřeva**

Štípatelnost dřeva je charakterizována pomocí odolnosti proti štípaní [Pa], která se určuje dle normy ČSN 49 0119 [37].

5. Ohýbatelnost dřeva (plastičnost)

Ohýbatelnost [-] se zvyšuje plastifikací dřeva a lepší hodnoty vykazují dřeviny s dlouhými vlákny s minimálním odklonem od podélné osy, s rovnoměrnou stavbou letokruhů a vyšším množstvím ligninu ve dřevu [9].

Z mechanického hlediska jsou ideální pro výrobu lyží dřeva se střední tvrdostí, pružná, špatně se lámající a v neposlední řadě se klade důraz i na jejich odolnost proti vodě.

3.2.2 Jasan

Jasanové dřevo se řadí mezi středně tvrdá dřeva (nehtem lze vytvořit rýhu pouze na podélných řezech), dobře štípatelná, leštitelná a obrobitelná. Dřevěné paprsky jsou okem téměř neviditelné. Vykazuje střední pevnost v ohybu a tlaku, střední rázovou houževnatost, nízkou tuhost a výborné předpoklady pro ohýbání. Díky jeho mechanickým vlastnostem bylo toto dřevo v lyžařském průmyslu dříve hojně využíváno. Jasanovou skluznici bylo nezbytné řezat na v zimě vzniklý povrch letokruhu (tzv. na blánu) a v rámci údržby lyže bylo potřeba zabrušovat póry pod vodou jemným smirkem a napustit materiál skluznice šelakem¹.

3.2.3 Bříza

Díky pravidelnému růstu břízy má toto dřevo všude stejnoměrné vlastnosti. Jedná se o materiál středně tvarově stálý, s vysokou pevností v ohybu a tlaku, střední tuhostí a střední rázovou houževnatostí. Je dobře obrobitelný, ale má sklony k třepení. V lyžařském průmyslu používaný jen výjimečně.

3.2.4 Topol

Topol je rychle rostoucí dřevina s měkkým a lehkým dřevem. Dřevo je šedobílé, s málo zřetelnými letokruhy a s téměř neviditelnými póry a dřevěnými vlákny.

¹Šelak je přírodní pryskyřice živočišného původu, po jehož zpracování vzniká tzv. jádrový lak, hodící se např. k opravě rýh a škrábanců ve dřevě.

Při použití vykazuje střední tvarovou stabilitu, je snadno obrobitelný a i přes nízkou pevnost v ohybu je vyhledávaným materiálem používaným ve skladbě lyží (za účelem jejich odlehčení). Výhodou je jeho schopnost dobře přijímat lepidlo, nevýhodou potom fakt, že při růstu nabírá do svých pórů jemný písek, jenž rychle otupuje ostří nástrojů při jeho zpracování.

3.2.5 Hikora bílý ořech

Struktura tohoto dřeva umožňuje dobře pohlcovat vibrace a díky tomu, že toto dřevo prakticky nemá letokruhy se skluznice kvůli nasákavosti lyží nemusela řezat přesně na blánu. Hikora se řadí mezi dřeva s vysokou hustotou, tuhostí a pevností v ohybu a tlaku. Kmeny byly dováženy ze Severní Ameriky do Hamburku, kde si jednotliví výrobci vybírali konkrétní kusy. Zásadní nevýhodou této dřeviny byla její pořizovací cena, v dalších letech se tedy používala už pouze na skluznice. V současnosti se toto dřevo na výrobu lyží již nepoužívá.

3.2.6 Buk

Dřevo buku je rovnovláknité, se širokými dřeňovými paprsky, jemnou, pravidelnou strukturou a je barvy světle krémové až růžovo hnědé. Řadí se mezi dřeviny se střední pevností v ohybu, střední tuhostí a rázovou houževnatostí, vysokou pevností v tlaku a má vynikající předpoklady pro ohyb. Buk je velmi dobře opracovatelný, snadno se lepí a lze jej výborně povrchově upravovat. Díky jeho vlastnostem je hojně využíván v lyžařském průmyslu. V jeho neprospěch hovoří jeho velká hmotnost, proto je často kombinován s dřevem lehkým, jako je například topol.

3.2.7 Javor

Javor vykazuje střední tvarovou stálost a hustotu a vysokou pevnost v ohybu a tlaku. Toto dřevo se velmi dobře lepí, povrchově upravuje a leští. Pro výrobu lyží se jak v minulosti, tak v současnosti stále používá [6, 38] .

3.3 Plasty

3.3.1 Polyethylen (PE)

Již od dvacátých let 20. století se využívaly umělé skluznice a nejpoužívanějším materiálem tehdejší doby se staly celuloidové fólie a politury na bázi celulózy, jež byly snadno dostupné a opravitelné a zároveň odolné proti vlhku a otěru. Nevýhodou zůstával ale fakt, že celuloid byl za nízkých teplot křehký a nebylo jej možné voskovat.

Dalším materiálem tehdejší doby byla kaseinová umělá rohovina. Kasein je protein, jenž např. v kravském mléce tvoří přibližně 80 % všech mléčných bílkovin. Tato struktura pro povrch skluznice, podobná té současné, byla patentována v roce 1931. Následně, po krátké éře umakartových skluznic, přichází na řadu polyethylen, který byl schopen absorbovat osm až třicetkrát více vosku než zmiňovaný umakart a nevykazoval křehké vlastnosti při nízkých teplotách [6].

Polyethylen je termoplast, vznikající polymerací ethenu a u kterého se rozlišují dva typy, a to PE-LD (s nízkou hustotou) a PE-HD (s hustotou vysokou). Vysokohustotní polyethylen je díky vysoké krystalinitě výrazně tvrdší, méně ohebný, a poněvadž má v molekule minimum postranních řetězců, jeho hustota je vždy vyšší než $940 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [39].

V současnosti se drtivá většina skluznic vyrábí právě z tohoto materiálu s možností určité příměsy. Často se přidává např. grafit, jenž zlepšuje skluzné vlastnosti lyže.

Dle technologického procesu výroby se skluznice dělí na extrudované a sintrované. Tyto typy se liší svou molekulovou hmotností, kterou lze charakterizovat jako schopnost absorbovat vosky do nano- a mikropórů, v nichž vosk po zažehlení zůstává. Extrudovaná skluznice se vyrábí vytlačováním roztaveného polyethylenu do předpřipravené formy, je méně porézní, méně náročná na údržbu, ale s menší skluzností než skluznice sintrovaná. Ta je považována za kvalitnější, vyrábí se slisováním práškového polyethylenu a jeho krátkodobým zahřátím, vyznačuje se velkou molekulovou hmotností a velmi dobrými skluznými vlastnostmi [24].

Při popisu mechanického chování polyethylenu je na tento materiál nahlíženo jako na materiál izotropní (viz kap. 3).

3.3.2 ABS

Jedním z dalších plastů používaných pro výrobu lyží je akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Tento amorfní termoplastický kopolymer je odolný vůči různým typům mechanického zatížení. Mezi jeho vlastnosti patří vysoká tuhost, houževnatost, nízká nasákavost a dle použitého typu také odolnost proti nízkým i vysokým teplotám. Tento materiál se používá na vyztužení boků a špičky lyže, k ochraně jádra před mechanickým poškozením a vniknutí případné vlhkosti do lyže. ABS má ze všech materiálů používaných pro výrobu lyže největší roztažnost, se kterou je nutno při lisování lyže počítat, aby nedošlo k případnému zkroucení konstrukce [6].

3.3.3 Polyamid

Polyamidová vlákna jsou vlákna z lineárních makromolekul s opakujícími se funkčními amidovými skupinami. Obecně používaná značka pro tento materiál je PA, přičemž existuje mnoho druhů, kde mezi dva nejrozšířenější patří polyamid 6 a polyamid 6,6. Polyamid se v lyžařském průmyslu využívá pro vrchní fólii lyže, na kterou je nanesen potisk a ta tak hraje hlavní roli v oblasti designu lyže. Pro jednodušší designy se používá sítotisk, kdy jsou přes šablony na fólii nanášeny postupně jednotlivé barvy. Další metodou je potom termosublimační tisk, kdy se design potisku připraví v grafickém editoru, vytiskne se na termosublimační papír a potisk se z papíru následně na fólii přenesení za zvýšené teploty v lisu [25, 39].

3.3.4 Další části konstrukce

Syntetický kaučuk se používá převážně do freeridových lyží, od kterých je vyžadován ve sněhu větší „klid“. Gumová vrstva uvnitř skladby totiž umožňuje jakési plutí vrstev mezi sebou, čímž zpomaluje návratnost lyže do její původní pozice a tlumí její vibrace. Gely a termoplasty se využívají za stejným účelem, tedy tlumení lyže, ale jsou většinou soustředěny jen do jednoho (oscilačního) místa [6].

3.4 Kompozity

3.4.1 Skelný laminát

Skelné lamináty se skládají ze skleněných vláken, které jsou prosyceny epoxidovou pryskyřicí. Jejich výhodou je nízká hmotnost, vysoká tuhost a pevnost a dále dobrá životnost a odolnost. Tenká skleněná vlákna se vyznačují svou pružností, ohebností a pevností v tahu, epoxidová pryskyřice je potom zpevňuje do pružné jednolitě plochy. Pro výrobu lyží se používá textilie s plátňovou vazbou, jež je považována za nejpevnější. Prameny vláken v osnově i útku jsou stejně silné, stejnoměrně vzdálené a prameny útku prochází vždy pod a nad každým pramenem (tvoří tedy tzv. vyváženou plátňovou skladbu) [22]. Dalšími typy používanými při výrobě lyže jsou skelné lamináty biaxiální, popř. triaxiální. Výjimkou není ani používání kombinace vláken různých druhů jako např. spojení vláken uhlíkových a skleněných.

3.4.2 Kevlarový laminát

Kevlar je obchodní značkou para-amidového vlákna uvedenou na trh roku 1971. Aramid je spojením slov aromatický polyamid a tato sloučenina vzniká napojením aromatických struktur na polyamidový řetězec. Dalším stupněm vývoje jsou potom para-amidy, které jsou charakteristické vysokou pevností v tahu, srovnatelnou s uhlíkovými vlákny, při zachování nízké hmotnosti. Kevlarová textilie se prosycuje, stejně jako skelná či uhlíková, epoxidovou pryskyřicí. Kevlar má své výborné vlastnosti převážně díky vysokému podílu uhlíku ve stavbě mřížky. Po svém objevu se tento materiál začal používat v mnoha lyžích, což vedlo, oproti lyžím pouze se skelným laminátem, ke snížení jejich hmotnosti. V lyžařském průmyslu v mnoha případech kevlarový laminát doplňuje uhlíkovou výztuž [6].

3.4.3 Uhlíkový laminát

Uhlíkové vlákno je vlákno tvořené atomy uhlíky v různých modifikacích, jehož krystalové uspořádání způsobuje, že vykazuje výbornou pevnost v tahu. Uhlíková vlákna ve spojení s epoxidovou pryskyřicí disponují právě vysokou pevností v tahu (ve většině případech vyšší než vlákna skelná či kevlarová), nízkou měrnou hmotností a nulovou plastickou deformací při nárazu (uhlíková vlákna se lámou na mnoho malých částí a k poškození dochází pouze v místě nárazu). V lyžařském průmyslu je tento materiál hojně rozšířený [4, 39].

K účelům popisu mechanického chování výše uvedených laminátů je na tyto materiály nahlíženo jako na materiály ortotropní (viz kap. 3).

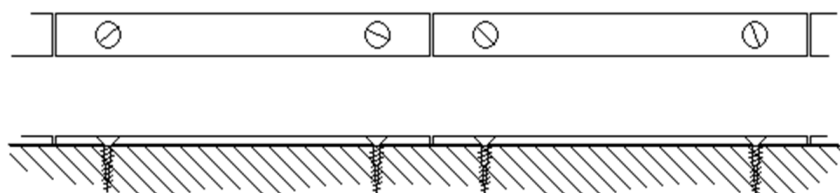
3.5 Kovy

3.5.1 Slitiny hliníku

Mezi kovy používanými v lyžařském průmyslu je velice často zmiňovaný titan, ale ve skutečnosti se do lyží prakticky nekládá díky jeho vysokým nákladům na výrobu. Výhodnější je potom hliník, ale poněvadž čistý hliník má poměrně malou pevnost, používá se ve formě slitin. Neznámější z nich je často s titanem zaměňovaný titanal, skládající se z 88,6 % hliníku, 7 % zinku, 2,4 % hořčíku, 1,7 % mědi a 0,1 % zirkonia. Zinek slouží ke zvýšení pevnosti. Hořčík zajišťuje vytvrditelnost a zlepšuje odolnost proti korozi a pevnost. Měď potom zvyšuje tvrdost a pevnost dané slitiny a zirkonium zlepšuje její odolnost proti korozi [39]. Slitiny hliníku mají poměrně velkou tepelnou roztažnost, se kterou musí být v rámci lisování lyže za tepla počítáno, aby nedošlo ke zohýbání lyže po vychladnutí.

3.5.2 Ocel

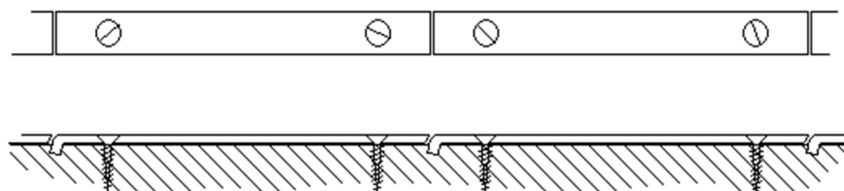
Ocel je používána na výrobu hran lyže. Velký pokrok zaznamenala konstrukce lyže ve dvacátých letech 20. století, kdy se na lyže začaly šroubovat ocelové hrany, což výrazně zjednodušilo jejich ovládání v terénu. Nejdříve byly hrany tvořeny obdélníkovými plíšky přišroubovanými vruty k lyži (viz obr. 8).



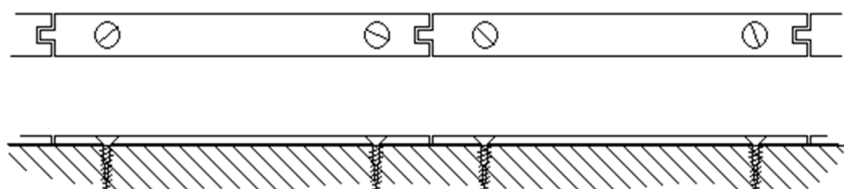
Obrázek 8: Nákres původní hrany [6].

Díky hranatému náběhu těchto plíšků docházelo ale k jejich častému vy-
padávání a výrobci tedy začali používat segment hrany na jedné straně
ohnutý a na druhé naopak zkosený (viz obr. 9).

Zásadní inovaci vložil do konstrukce Rakušan Leo Breier roku 1937 s jeho patentem tzv. „zámkovými hranami“, které byly na některých lyžích používány až do konce 70. let (viz obr. 10) [6].



Obrázek 9: Nákres hrany se zahnutým čelem [6].



Obrázek 10: Nákres zámkové hrany [6].

V současnosti jsou hrany tvořeny dvěma dlouhými tenkými pláty ohnutými dle tvaru lyže, kde každý plát je vložen po jednom boku lyže. Na ocel, používanou k výrobě hran, je nahlíženo při numerickém modelování jako na izotropní materiál (viz kap. 3). Na obr. 11 je znázorněn detail geometrie nynějších hran a obr. 12 ukazuje vložení hran do formy při výrobě lyží značky SPORTEN.



Obrázek 11: Detail geometrie hran.



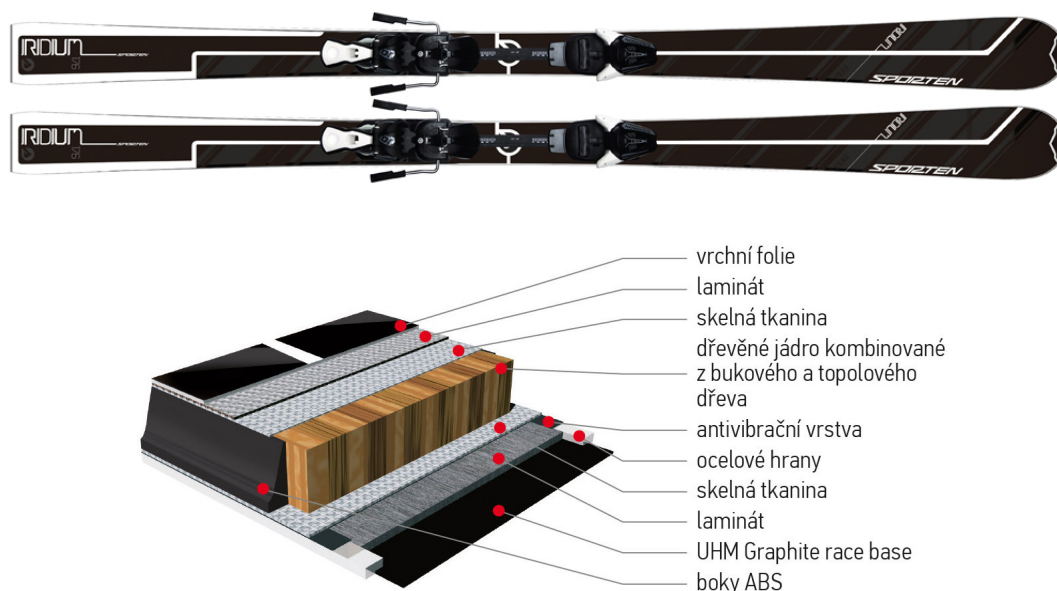
Obrázek 12: Vložení hran do lyží značky SPORTEN.

4 Experimentální měření

Tato kapitola je věnována experimentálním zkouškám provedeným na vzorcích materiálů, používaných ve sjezdových lyžích IRIDIUM firmy SPOR-TEN. Pro účely této práce byly vykonány statické zkoušky tahem a ohybem (popř. dynamická zkouška modální analýzou) s cílem určit materiálové charakteristiky dílčích částí lyže. Je zde zahrnut popis skladby lyže IRIDIUM, zaslané materiály a podoba experimentů. Na základě rozměrů a počtu získaných materiálů nebylo možné experimentální zkoušky provést v souladu s danými normami.

4.1 Použité materiály v lyži IRIDIUM

Sjezdové lyže IRIDIUM se řadí v nabídce firmy SPORTEN mezi tzv. exkluzivní. Tyto lyže jsou dostupné ve třech délkách, a to 160, 168 a 170 cm, s profilem 123-73-105 mm a rádiusem pohybujícím se (v závislosti na délce lyže) v rozmezí mezi 10,9 a 16,8 m. Výrobce udává, že se jedná o lyže vynášující se širokým středem a dvojitým rádiusem, vhodné pro sportovní až závodní lyžaře [32]. Na obr. 13 je znázorněn pohled shora na lyže IRIDIUM a popis jejich skladby.



Obrázek 13: Lyže IRIDIUM [32].

Následující výčet obsahuje části lyže (materiály), jež byly k dispozici od firmy SPORTEM k účelům této práce. Vyjma prvních tří položek byly všechny segmenty v takové podobě, ve které se přímo používají v konečné fázi výroby lyží, tzn. před vložením do formy:

- **topolové dřevo**

Topolové dřevo je použito na boky dřevěného jádra.

- **bukové dřevo**

Bukové dřevo představuje vnitřní část dřevěného jádra lyže.

- **dřevěné jádro (spárovka)**

Dřevěné jádro je tvořeno dřevěnými lamelami sestávající se ze tří částí, a to části topolové, bukové a topolové.

- **textilní kompozit**

Textilní kompozit je tvořen jednou vrstvou skelné textilní výztuže (plátňová vazba v poměru osnova:útek 60:40) a epoxidovou pryskyřicí.

- **polyamidová vrchní fólie**

- **ABS ochrana**

- **dva druhy skelné tkaniny**

Biaxiální a triaxiální skelná výztuž.

- **polyethylenová skluznice**

- **ocelové hrany**

- **dvousložkové epoxidové lepidlo Letoxid-LH 103**


Tabulka 1 obsahuje počet kusů obdržených materiálů, jejich rozměry, hmotnosti a vypočtené hustoty. U hran je potom vypsána průměrná hmotnost, resp. hustota všech dvanácti vzorků. Pro účely mechanických zkoušek bylo potřeba nejprve vzorky rozřezat na menší segmenty, jejichž rozměry a vizuální podoba je zahrnuta v tabulkách 2 až 6.

Tabulka 1: Základní údaje zaslaných materiálů lyže IRIDIUM.

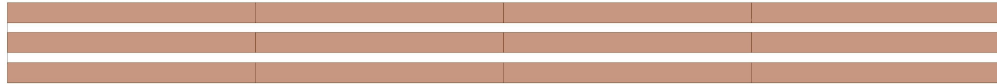
Část lyže	Rozměry				
	délka [mm]	šířka [mm]	tloušťka [mm]	hmotnost [g]	hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
topol					
1	1000	79,40	5,40	198,2	462,263
2	1000	79,40	9,70	276,0	358,357
3	1000	79,90	9,91	276,0	348,568
buk					
1	1000	99,95	5,89	374,0	635,292
2	1000	99,95	9,92	687,0	692,886
3	1000	100,60	10,32	592,0	573,111
spárovka					
1	1000	100,10	5,45	330,0	604,899
2	690	100,61	15,50	425,0	394,972
3	1000	100,50	15,28	601,0	391,367
kompozit					
1	1000	122,80	0,59	161,4	2227,681
2	1000	122,80	0,59	161,1	2223,541
3	1000	122,80	0,59	161,7	2231,822
4	1000	122,80	0,59	162,0	2235,963
5	1000	122,80	0,59	161,6	2230,442
vrchní fólie					
1	1000	117,20	0,57	63,8	954,853
2	1000	117,20	0,57	63,7	954,104
3	1000	117,20	0,57	63,5	950,811
4	1000	117,20	0,57	63,6	951,709
ABS					
1	1001	75,00	4,65	341,0	976,800
2	1001	75,20	4,55	342,0	998,533
tkanina č.1					
1	1000	122,90	0,55	79,1	1169,746
2	1000	122,90	0,55	79,1	1170,175
3	1000	122,90	0,55	78,4	1159,375
tkanina č.2					
1	1000	122,90	0,55	78,9	1167,808
2	1000	122,90	0,55	79,1	1170,027
3	1000	122,90	0,55	79,6	1178,459
skluznice					
1	1000	122,42	1,31	153,8	959,031
2	1000	122,42	1,31	157,0	978,860
3	1000	122,42	1,31	155,6	970,442
4	1000	122,42	1,31	153,6	957,596
hrany					
1-12	1000	6,76	1,07	39,2	5419,869

Tabulka 2: Rozměry vzorků topolového dřeva.

Topol č.1			
Úhel natočení	délka [mm]	šířka [mm]	počet kusů
0°	250,0	20	6
± 45°	90,0	20	10
90°	79,4	20	5




Topol č.2 - 3			
Úhel natočení	délka [mm]	šířka [mm]	počet kusů
0°	250,0	20	12




Tabulka 3: Rozměry vzorků bukového dřeva.

Buk č.1			
Úhel natočení	délka [mm]	šířka [mm]	počet kusů
0°	250	20	8
± 45°	110	20	8
90°	100	20	6

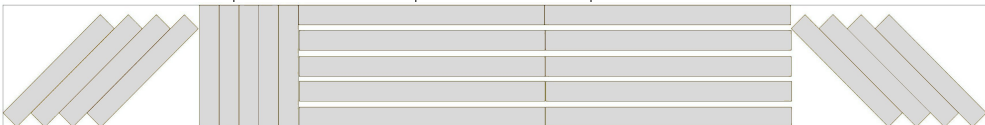


Buk č.2 - 3			
Úhel natočení	délka [mm]	šířka [mm]	počet kusů
0°	250	20	16



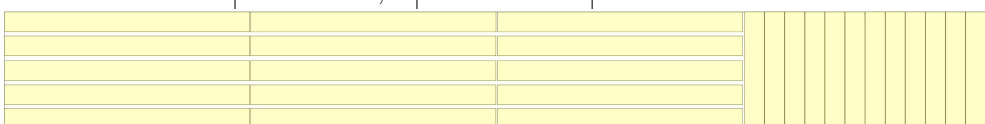
Tabulka 4: Rozměry vzorků textilního kompozitu.

Textilní kompozit			
Úhel natočení	délka [mm]	šířka [mm]	počet kusů
0°	250,0	20	10
± 45°	140,0	20	8
90°	122,8	20	5



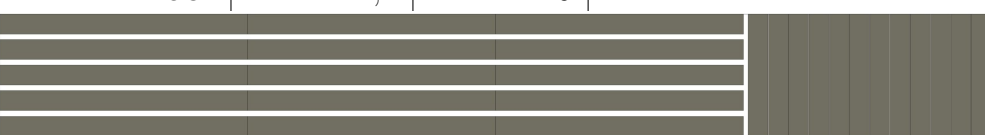
Tabulka 5: Rozměry vzorků fólie.

Fólie			
Úhel natočení	délka [mm]	šířka [mm]	počet kusů
0°	250,0	20	15
90°	117,4	20	12



Tabulka 6: Rozměry vzorků skluznice.

Skluznice			
Úhel natočení	délka [mm]	šířka [mm]	počet kusů
0°	250,0	20	15
90°	122,4	20	12



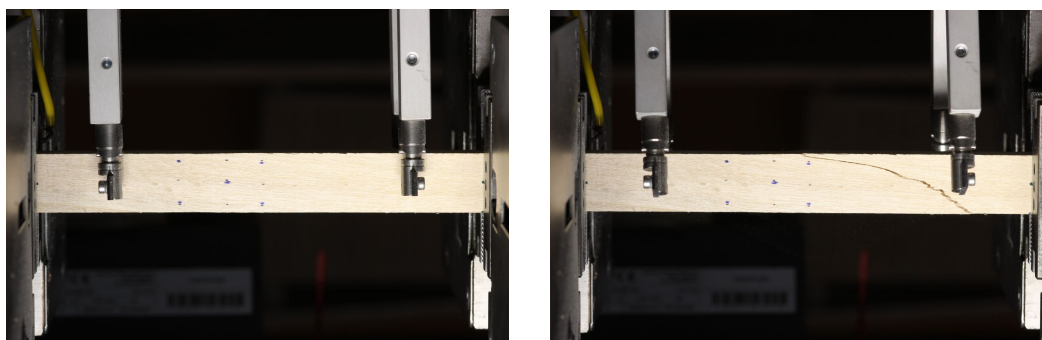
4.2 Topolové dřevo

U topolového dřeva byly provedeny mechanické zkoušky tahem a ohybem. Statická zkouška tahem probíhala zatěžováním vzorku dřeva uchyceného v upínacích čelistech trhacího stroje. Zkouška byla řízena posunutím příčnicku konstantní rychlostí. Velikost relativního prodloužení byla určeno pomocí extenzometru (průtahoměru) umístěného nad střední částí vzorku. Statická zkouška ohybem probíhala zatížením vzorku v místě jeho středu, umístěného na dvou podpěrách s minimální dotykovou plochou, které zároveň určovaly jeho aktivní délku.

4.2.1 Zkouška tahem a ohybem

Tah

Statická zkouška tahem probíhala při rychlosti $v = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až do přetržení vzorku. Zkouška byla realizována na deseti vzorcích s různým natočením vláken topolu č.1, na třech vzorcích topolu č.2 a třech vzorcích topolu č.3. Obr. 14 zobrazuje fotografie tahové zkoušky na vzorku topolu č.3 s natočením vláken 0° .



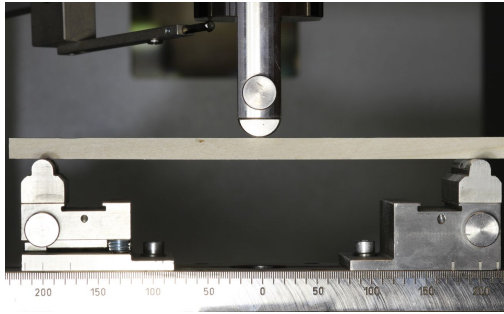
(a) Referenční stav.

(b) Stav po přetržení.

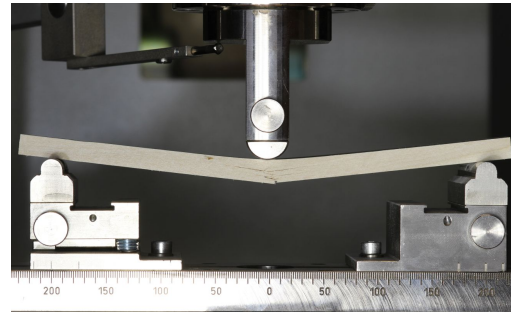
Obrázek 14: Tahová zkouška topolu.

Ohyb

U tříbodového ohybu byla rychlost zatěžování $v = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a pro tuto zkoušku byly použity tři kusy topolu č.1 s natočením vláken 0° a dva kusy s natočením 90° . U topolu č.2 potom bylo měřeno vzorků celkem šest, všechny s natočením vláken 0° . Obr. 15 ukazuje realizaci ohybové zkoušky na vzorku topolu č.2 s natočením vláken 0° .



(a) Referenční stav.



(b) Stav po přetržení.

Obrázek 15: Ohybová zkouška topolu.

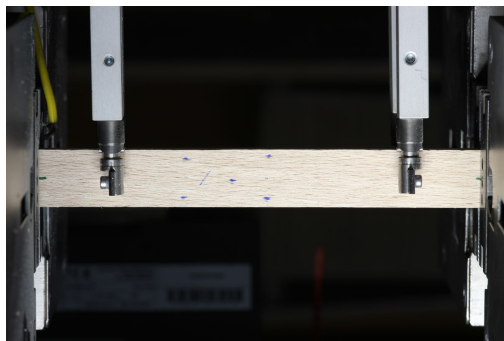
4.3 Bukové dřevo

U dřeva bukového byly, stejně jako u topolu, realizovány opět mechanické zkoušky tahem a ohybem principiálně stejným způsobem se stejnou rychlostí zatěžování.

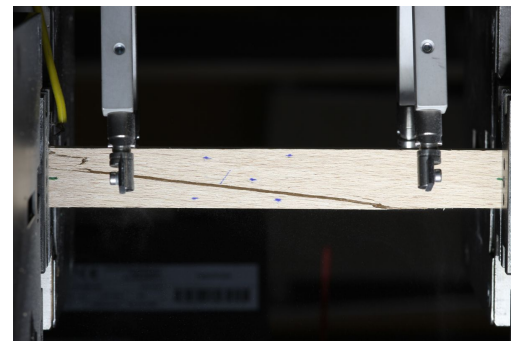
4.3.1 Zkouška tahem a ohybem

Tah

Zkouška tahem probíhala u bukového dřeva č.1 celkem na dvanácti vzorcích s různým natočením vláken a na buku č.2 a č.3 vždy na třech kusech. Obr. 16 zobrazuje fotografie tahové zkoušky na vzorku topolu č.3 s natočením vláken 0°.



(a) Referenční stav.

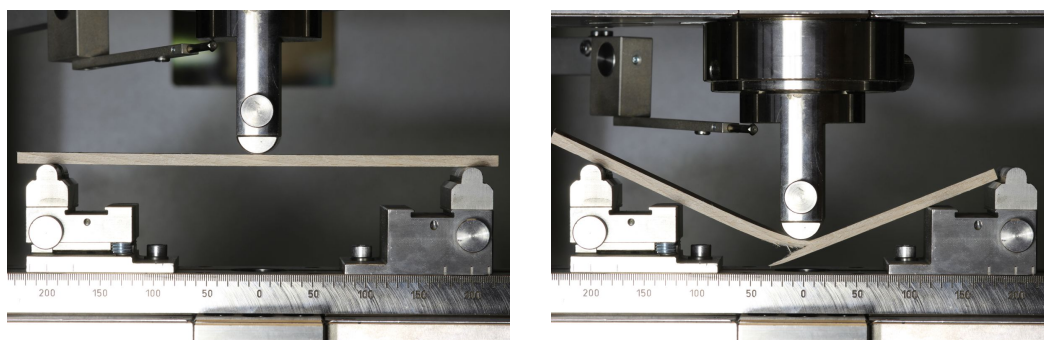


(b) Stav po přetržení.

Obrázek 16: Tahová zkouška buku.

Ohyb

Pro ohybovou zkoušku byly zvoleny tři kusy s natočením vláken 0° , tři kusy s natočením 45° buku č.1 a šest kusů s natočením vláken 0° buku č.2.



(a) Referenční stav.

(b) Stav po přetržení.

Obrázek 17: Ohybová zkouška buku.

4.4 Textilní kompozit, fólie a skluznice

4.4.1 Zkouška tahem

Na všech zmíněných částech byla uskutečněna statická zkouška tahem za účelem zjištění materiálových charakteristik vzorků. Opět se jednalo o zkoušku řízenou posuvem, kde u textilního kompozitu byla rychlost zatěžování $v = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, u fólie nejprve $v = 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a následně $40 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, a skluznice byla namáhána rychlostí $v = 50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

U kompozitu byly vybrány série vždy po třech kusech vzorku s orientací vzhledem k osnově (delší hraně) dodaného kusu 0° , $\pm 45^\circ$ a 90° . Skluznice a fólie byly namáhány ve třech případech vzhledem k delší hraně dodaného vzorku a ve třech případech vzhledem k hraně kratší. Obr. 18 až 20 znázorňují průběh těchto zkoušek. V případě kompozitu síla působí ve směru osnovy vzorku, u fólie a skluznice jsou fotografie tahových zkoušek u vzorků vzhledem ke kratší hraně dodaných kusů.

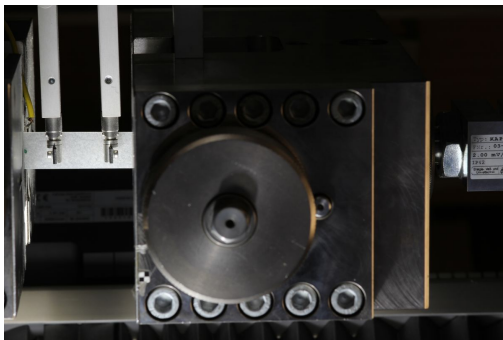


(a) Referenční stav.

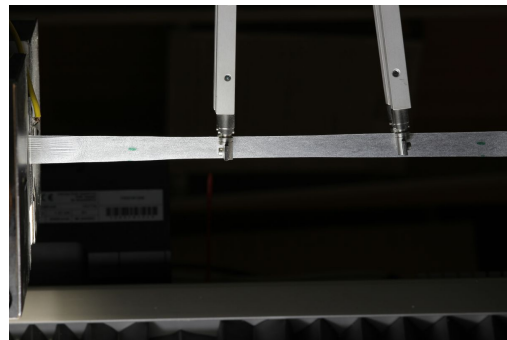


(b) Stav po přetržení.

Obrázek 18: Tahová zkouška textilního kompozitu.

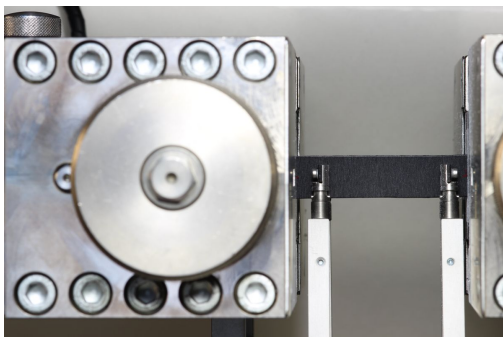


(a) Referenční stav.



(b) Stav těsně před přetržením.

Obrázek 19: Tahová zkouška fólie.



(a) Referenční stav.



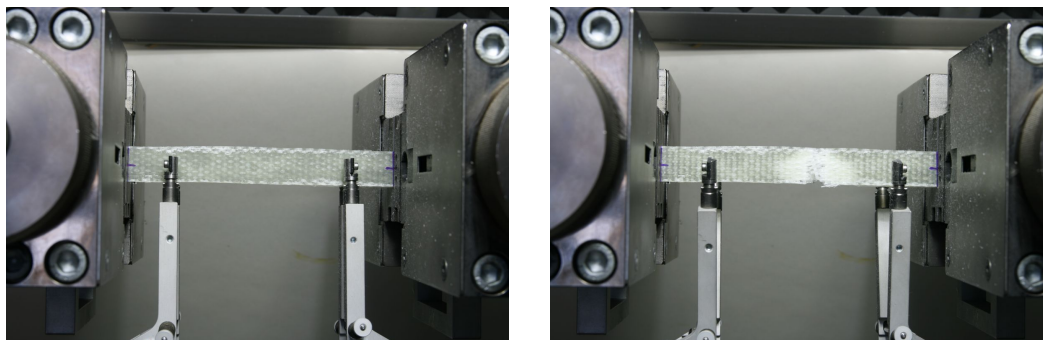
(b) Stav těsně před přetržením.

Obrázek 20: Tahová zkouška skluznice.

4.5 Epoxidové lepidlo

Za účelem stanovení materiálových charakteristik použitého dvousložkového epoxidového lepidla po vytvrzení byla vykonána statická zkouška tahem na vzorcích tvořených kombinací „textilní kompozit-lepidlo-textilní kompozit“ a „skluznice-lepidlo-skluznice“, které byly před experimentem vloženy do pece na 20 minut při teplotě 80 °C. Charakter zkoušky byl opět identický jako ve výše zmíněných případech s rychlostí zatěžování $v = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Tahová síla působila ve směru osnovy vzorku. Na obr. 21 je vyobrazena zkouška tahem na vytvrzeném vzorku tvořeném slepením dvou kompozitů pomocí epoxidového lepidla.

Tloušťka lepidla byla určena právě z těchto vytvrzených vzorků pomocí hustoty epoxidového lepidla po vytvrzení, hmotnosti celého vzorku a jednotlivých použitých kompozitů (skluznic) a znalosti šířky a délky vzorku. Hustota vytvrzeného epoxidového lepidla byla určena pomocí znalosti hmotnosti vytvrzeného lepidla, které zaujímalo předem daný objem.



(a) Referenční stav.

(b) Stav po přetržení.

Obrázek 21: Tahová zkouška vzorku „kompozit-lepidlo-kompozit“.

5 Určení materiálových charakteristik

Tato kapitola popisuje určení materiálových charakteristik jednotlivých vzorků na základě provedených experimentálních měření. V závislosti na charakteru materiálu bylo potřeba zjistit daný počet materiálových konstant. V závěru kapitoly jsou tabulky obsahující zjištěné materiálové konstanty.

5.1 Modul pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu lze určit pomocí zkoušky prostým tahem, při které nastává jednoosá napjatost. Dosazením do Hookeova zákona vyplývá vztah

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{A}. \quad (5)$$

kde E je modul pružnosti v tahu, F představuje sílu působící ve směru osy tělesa kolmo na průřez, A je plocha tohoto průřezu a l je v této práci vzdálenost měřících ramen extenzometru.

Další metoda určení modulu pružnosti je pomocí zkoušky tříbodovým ohybem, kde pro průhyb tenkého nosníku y platí (na základě Euler-Bernnouliho teorie)

$$y = \frac{Fl^3}{48EAJ_z}. \quad (6)$$

F je síla způsobující ohyb nosníku, l aktivní délka nosníku (určená vzdáleností podpěr), A plocha průřezu a J_z je kvadratický moment průřezu vzhledem k neutrální ose, kolmé k délce nosníku a procházející jejím těžištěm. Tento kvadratický moment lze zapsat vztahem

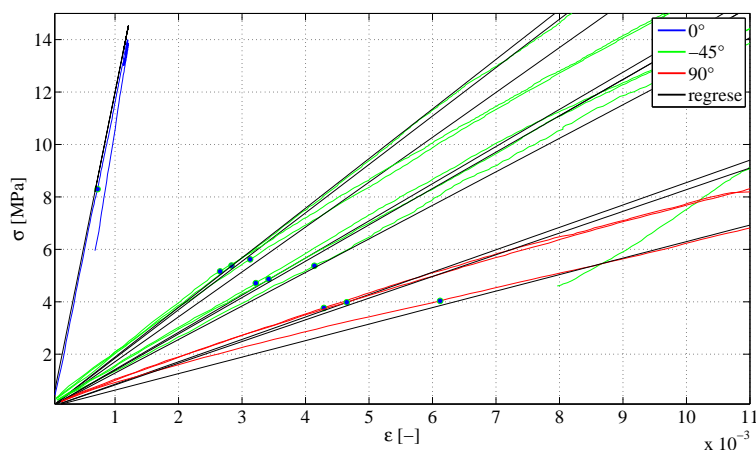
$$J_z = \frac{bh^3}{12}, \quad (7)$$

kde b a h jsou rozměry průřezu. Dosazení (7) do (6) vede k vyjádření modulu pružnosti v tahu.

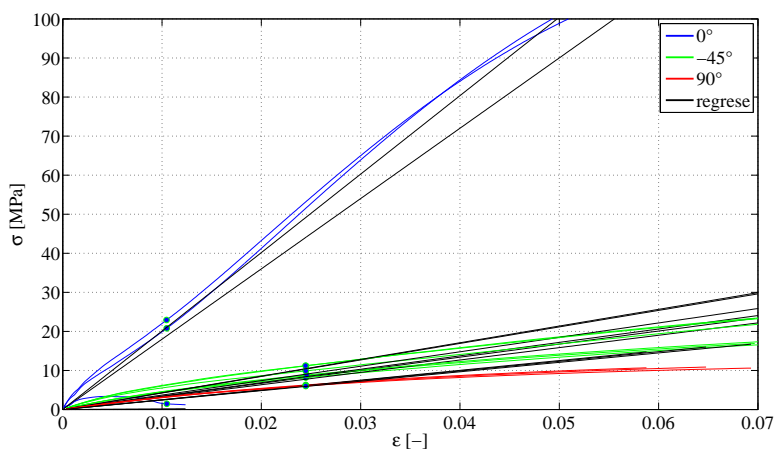
V prostředí MATLAB byly křivky závislosti napětí na deformaci, popř. síly na prodloužení, proloženy pomocí polynomické regrese a byla určena směrnice této aproximace. Polynomická regrese představuje proložení křivky polynomem, kde koeficienty hledaného polynomu jsou získány pomocí metody nejmenších čtverců tak, aby součet druhých mocnin odchylek původních hodnot od získaného polynomu byl minimální. V jednotlivých úlohách se vždy jednalo o regresi lineárním polynomem [39, 21].

Na topolové a bukové dřevo bylo v tomto případě pro zjednodušení celé úlohy nahlíženo jako na příčně izotropní materiál, pro jehož popis je potřeba znát pět nezávislých materiálových konstant, včetně modulu pružnosti v rovině izotropie a modulu pružnosti ve směru na ní kolmém (viz kap. 3). V praxi to znamená, že byl stanoven jak modul pružnosti v tahu ve směru vláken, tak ve směru kolmém na vlákna. Jak již bylo zmíněno dříve, dřevo hraje ve skladbě lyže jednu z nejdůležitějších rolí v ovlivnění konečných mechanických vlastností. Youngův modul byl proto pro lepší možnost srovnání vyjádřen jak ze zkoušky tahem, tak ze zkoušky ohybem.

Na obr. 22 a 23 jsou znázorněny grafy závislosti napětí na deformaci pro topolové a bukové dřevo pro vzorky s různým natočením vláken. Přímký reprezentují danou polynomickou regresi křivky v určeném intervalu.

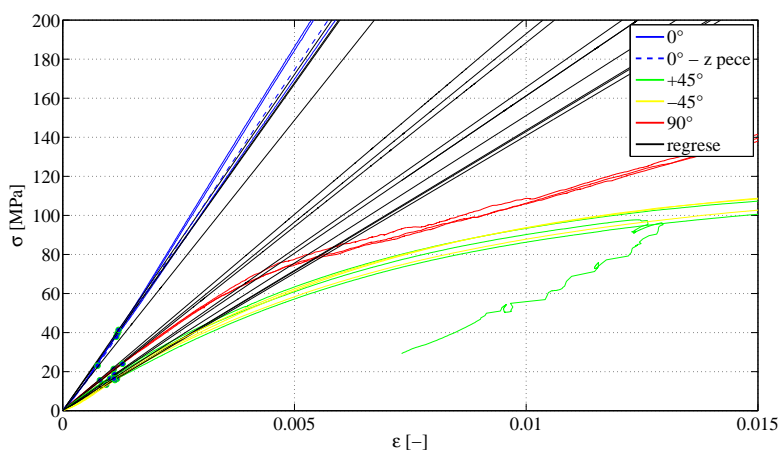


Obrázek 22: Závislost napětí na deformaci pro topolové dřevo.

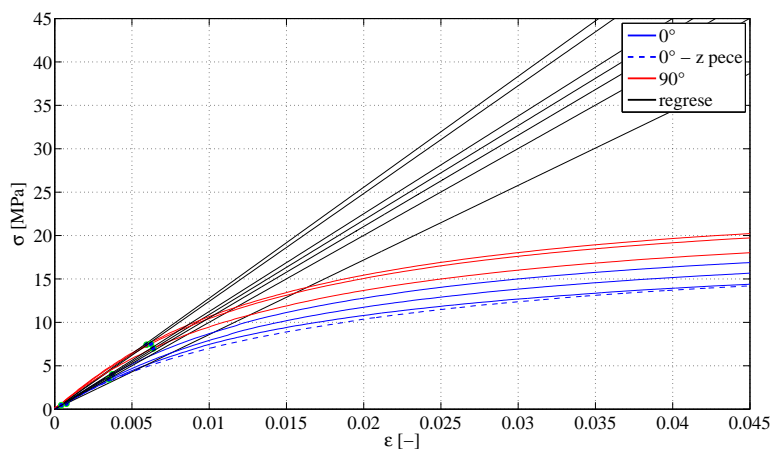


Obrázek 23: Závislost napětí na deformaci pro bukové dřevo.

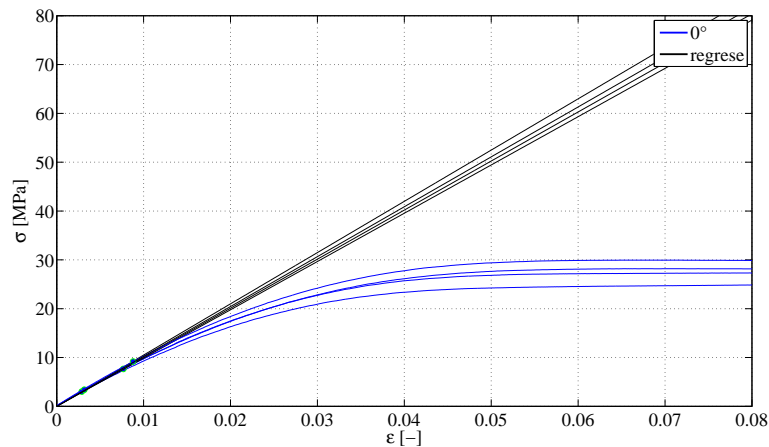
Na textilní kompozit bylo opět pro zjednodušení celé úlohy nahlíženo jako na příčně izotropní materiál (osnova byla brána jako hlavní směr izotropie), jehož modul pružnosti byl určen ve dvou směrech z mechanické zkoušky tahem. Skluznice a fólie byly pojaty jako izotropní materiál, pro něž je potřeba znát pouze dvě nezávislé materiálové konstanty. Modul pružnosti byl také experimentálně určen ze zkoušky v tahu. Obr. 24 až 26 ukazují závislosti napětí na deformaci jednotlivých vzorků, kde zde navíc čárkovaná křivka u textilního kompozitu a skluznice zastupuje vzorek, jenž prošel porovnání dalším teplotním cyklem v peci po dobu 20 minut za teploty 80 °C (identicky jako při lisování jednotlivých vrstev prosycených lepidlem při výrobě lyže).



Obrázek 24: Závislost napětí na deformaci vzorku textilního kompozitu.



Obrázek 25: Závislost napětí na deformaci vzorku skluznice.



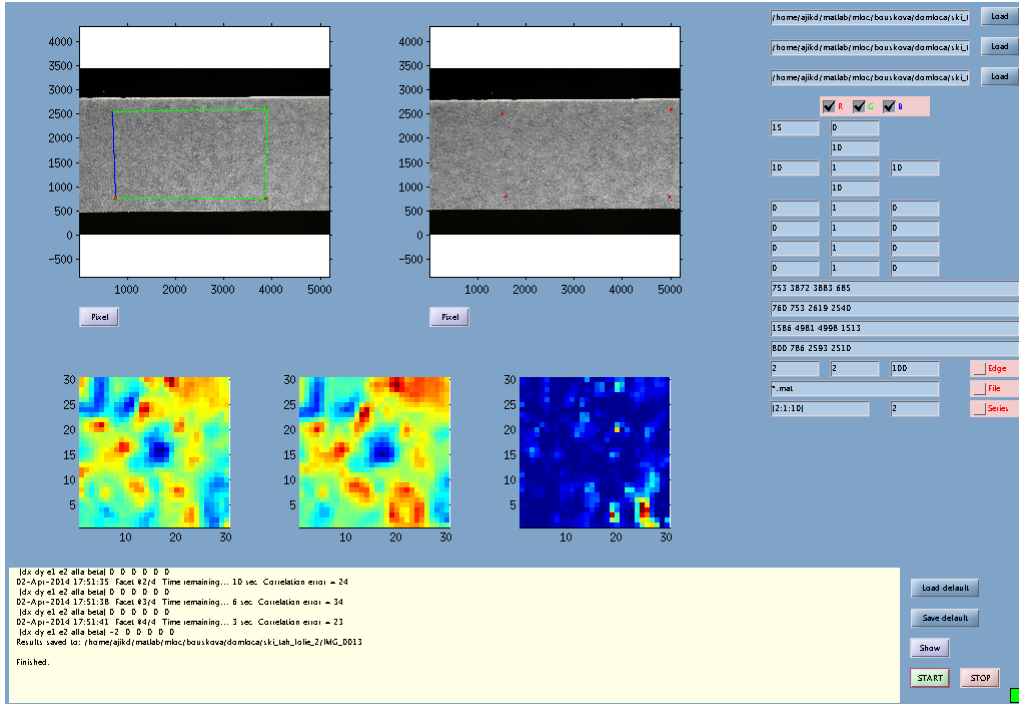
Obrázek 26: Závislost napětí na deformaci vzorku fólie.

5.2 Poissonovo číslo

Pomocí Hookeova zákona pro prostý tah, tj. pro jednoosou napjatost, lze Poissonovo číslo definovat následujícím vztahem

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}. \quad (8)$$

Pro stanovení hodnoty ν byl použit software mloc, který využívá korelaci digitálního obrazu. Tato metoda se řadí mezi optické bezkontaktní měřící metody, které na základě vzájemné korelace řeší problém shody dvou obrazů. Pomocí korelace referenčního a deformovaného digitálního obrazu vzorku jsou získána posunutí [7]. V další fázi byly pomocí programu MATLAB vypočítány hodnoty ν pro jednotlivé materiály. Pouze u epoxido-pryskyřicového lepidla bylo kvůli nemožnosti určení Poissonova čísla pomocí experimentu tato hodnota převzata ze zdrojů [5, 8]. Na obr. 27 je znázorněno prostředí softwaru mloc pro vzorek fólie.



Obrázek 27: Korelace digitálního obrazu v softwaru mloc.

5.3 Modul pružnosti ve smyku

U izotropních materiálů k materiálovým konstantám E a ν přibude konstanta G , jež je charakterizována jako poměr smykového napětí a deformace (zkosu), která díky tomuto napětí vzniká. Modul pružnosti ve smyku lze přímo vyjádřit pomocí dvou předcházejících veličin vztahem

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (9)$$

U materiálů, kde neexistuje ani jedna rovina symetrie elastických vlastností, je nutné pro zjištění této veličiny vyjádřit Hookeův zákon v systému potočeném vůči původnímu systému o úhel Θ , který v tomto případě je $\Theta = 45^\circ$.

Modul pružnosti ve smyku se vyjádří pomocí členu matice mimoosové poddajnosti

$$S_{11}' = S_{11} \cos^4 \Theta + S_{22} \sin^4 \Theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta, \quad (10)$$

který je popsán členy matice poddajnosti v původním systému, přenásobenými vhodnými kombinacemi goniometrických funkcí.

Pro S_{11}' platí

$$S_{11}' = \frac{\varepsilon_{xx}}{\sigma_{xx}}, \quad (11)$$

kde jak čitatel, tak jmenovatel jsou známy z mechanických zkoušek tahem vzorků s natočením vláken právě 45° . Z Hookeova zákona pro nepootočený systém vyplývají následující relace

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad S_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad a \quad S_{12} = -\frac{\nu}{E_2}. \quad (12)$$

Vyjádření modulu pružnosti ve smyku bylo provedeno v programu MATLAB u obou typů dřev a textilního kompozitu.

5.4 Materiálové charakteristiky daných materiálů

V tabulce 7 jsou shrnuty všechny experimentálně určené elastické konstanty. Pro jistotu byly dané hodnoty porovnány s hodnotami ve zdrojích [2, 14, 16, 20, 26, 33, 35, 39] pro případné ověření řádové shody daných veličin (viz Příloha).

Pro materiálové charakteristiky bukového a topolového dřeva byly použity hodnoty určené ze statické zkoušky tahem, protože po srovnání se zmíněnými zdroji a následnými zkušebními numerickými simulacemi (viz dále kap. 6, str. 53) byly hodnoty ze zkoušek ohybových uznány za nedostatečně se shodující s reálnými veličinami.

Tabulka 7: Experimentálně zjištěné materiálové charakteristiky částí lyže.

Elast. konstanty	Část lyže					
	Topol	Buk	Text.kompozit	Fólie	Skluznice	Lepidlo
E [MPa]	-	-	-	1016	983	28127
ν	-	-	-	0,4265	0,3423	0,4000
E_{11} [MPa]	11992	10940	33820	-	-	-
E_{22} [MPa]	771	797	19416	-	-	-
G_{12} [MPa]	594	1343	1873	-	-	-
G_{23} [MPa]	342	258	2580	-	-	-
ν_{12}	0,1289	0,5447	0,1692	-	-	-
ρ [kg·m ⁻³]	389,723	633,763	2787,362	952,869	966,482	1245,511

6 Zjednodušený model části sjezdové lyže

Tato kapitola popisuje nejprve tvorbu vzorků zjednodušené části lyže ze zaslaných materiálů, jež se používají při výrobě sjezdové lyže obchodní značky IRIDIUM firmy SPORTEN a následně zahrnuje realizaci odpovídajícího modelu v konečnoprvkovém řešiči MSC.Marc. V závěru kapitoly je porovnání výsledků modální analýzy reálného a parametrického modelu.

6.1 Výroba zkušebních vzorků

Výroba těchto zkušebních vzorků byla provedena v laboratoři katedry mechaniky na Západočeské univerzitě v Plzni. Splením jednotlivých zaslaných materiálů o velikosti 400 mm × 90 mm byly zhotoveny tři modely zjednodušené části lyže, kde dílčí vrstvy byly na sebe kladeny takovým způsobem, aby korespondovaly se stavbou sjezdové lyže IRIDIUM.

Pro účely práce byla skladba vzorků tvořena fólií, textilním kompozitem, dřevěným jádrem a skluznicí. Dřevěné jádro bylo tvořeno dřevěnými lamelami skládající se ze tří částí, a to části topolové, bukové a topolové s poměrem šířek v milimetrech 18:54:18. Jednotlivé segmenty byly v následujícím pořadí:

1. fólie
2. textilní kompozit
3. dřevěné jádro
4. textilní kompozit
5. skluznice

Pro zjednodušení byla zanedbána ve struktuře vzorku ABS ochrana, skelná tkanina a ocelové hrany. ABS ochrana zde nebyla zahrnuta z technologických důvodů, protože má speciální průřez a je specificky zapuštěna do boků lyže po celé jejich délce. U skelné tkaniny nebylo možné zajistit opakovatelnost výrobního procesu. Ocelové hrany byly zanedbány z důvodu jejich složité geometrie a tudíž problematické realizaci v numerickém modelu. Na obr. 28 jsou znázorněny materiály, jež byly ve struktuře lyže zanedbány (ocelové hrany byly vyobrazeny již v kap. 3 na obr. 11). Obr. 29 obsahuje fotografie jednotlivých použitých materiálů ve vzorku.



(a) ABS ochrana



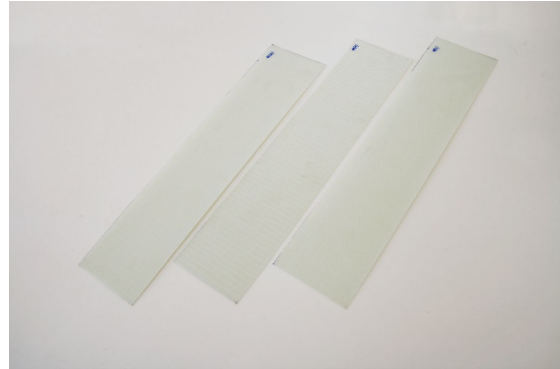
(b) Tkaniny

Obrázek 28: Materiály, jež byly ve struktuře vzorku zanedbány.

Dílčí materiály byly k sobě přilepeny tenkou vrstvou dvousložkového epoxido-pryskyřicového tixotropního lepidla značky Letoxid-LH 103, jež bylo k aplikaci připraveno smícháním obou složek v předepsaném hmotnostním poměru 100:46 [11]. Po nanesení lepidla byl vzorek z důvodu lepšího zafixování pozice vrstev mezi sebou vložen do formy, která byla tvořena dvěma ocelovými deskami o tloušťce 5 mm, sevřenými sadou svorníků o průměru 10 mm. Poté byl exemplář, dle popisu výroby sjezdových lyží získaných od výrobce, zatížen závažím po dobu 20 minut v peci při teplotě 80 °C za účelem vytvrzení lepidla v modelu. Připravený vzorek ve formě před vytvrzením v peci je zobrazen na obr. 30, konečná podobu vzorku je potom znázorněna na obr. 31.



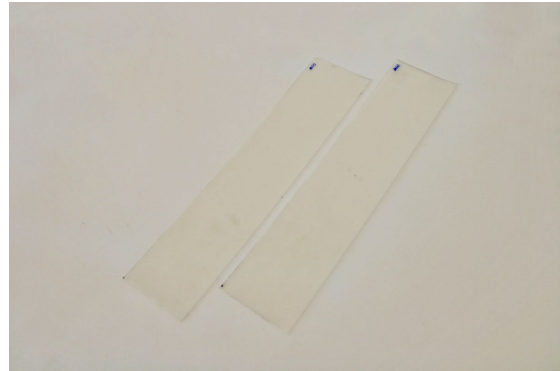
(a) Skluznice.



(b) Potahy z textilního kompozitu.



(c) Dřevěné jádro.



(d) Fólie.

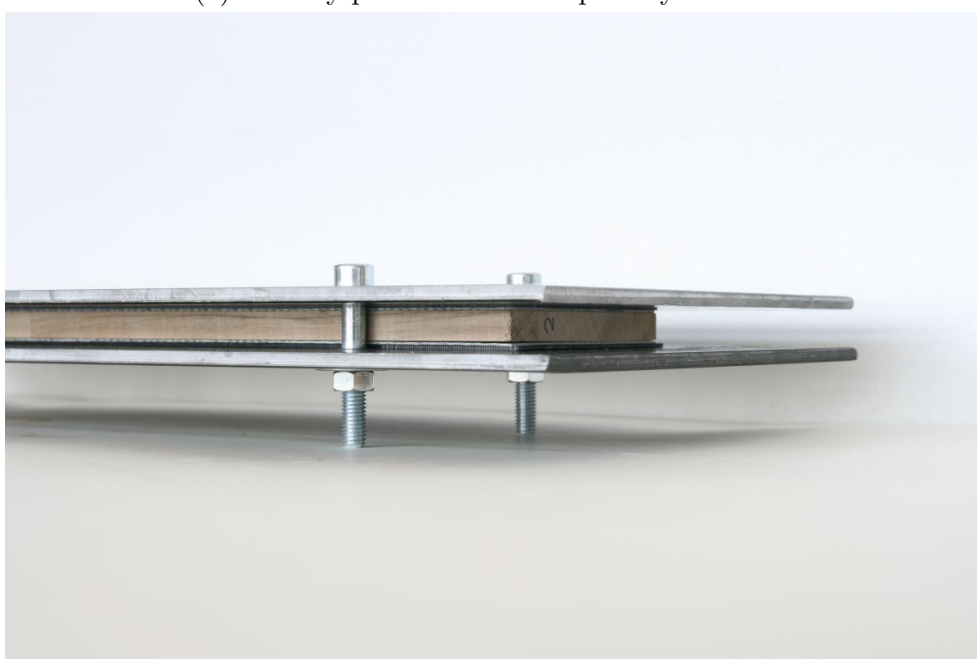


(e) Dvousložkové lepidlo.

Obrázek 29: Materiály použité při výrobě vzorku zjednodušené části lyže.

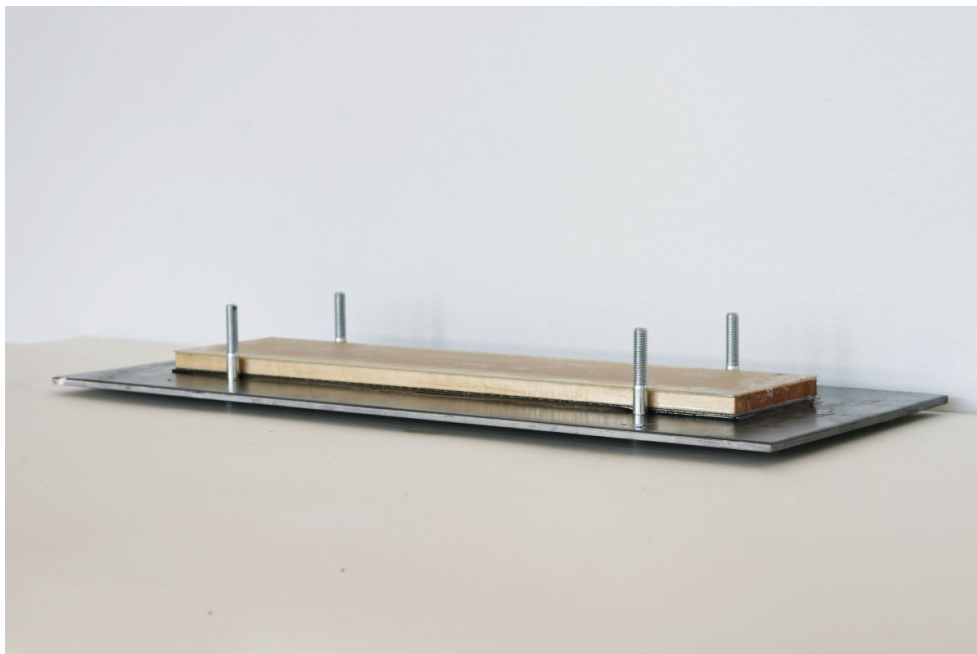


(a) Celkový pohled na vzorek před vytvrzením.

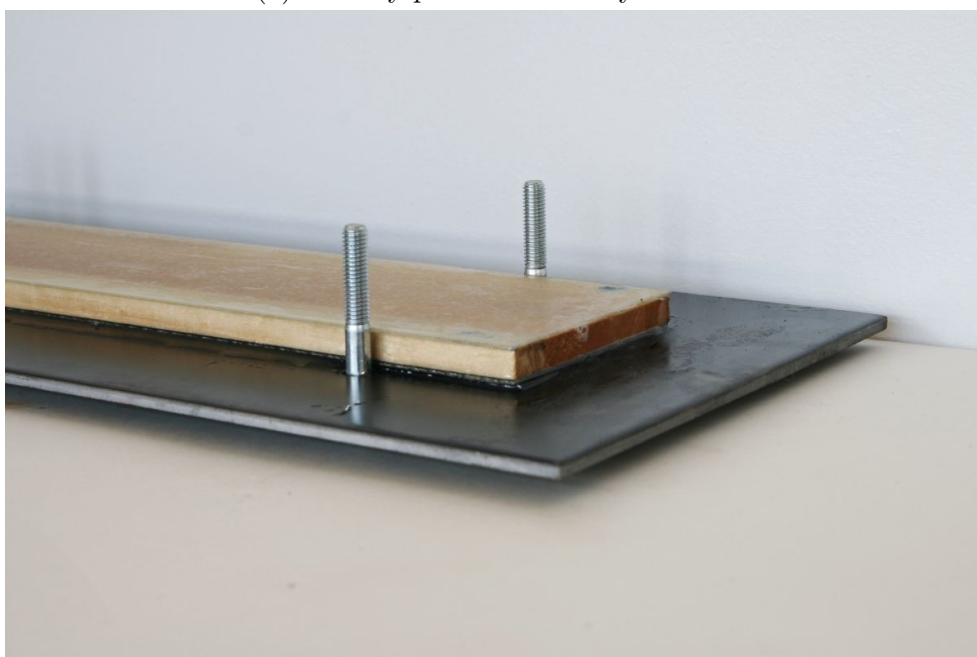


(b) Detail vzorku před vytvrzením.

Obrázek 30: Připravený vzorek zjednodušené části lyže před vytvrzením.



(a) Celkový pohled na hotový vzorek.



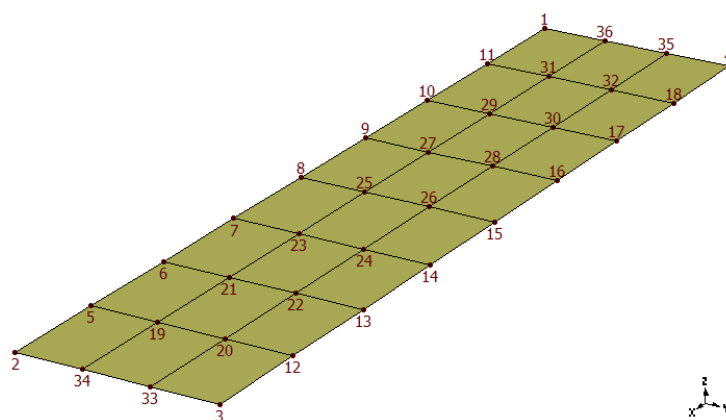
(b) Detail hotového vzorku.

Obrázek 31: Hotový vzorek po vytvrzení zjednodušené části lyže.

6.2 Modální analýza dřevěného jádra

Jak již bylo řečeno, dřevěné jádro tvoří jednu z nejdůležitějších komponent struktury lyže, a proto mu v této práci byla věnována zvýšená pozornost.

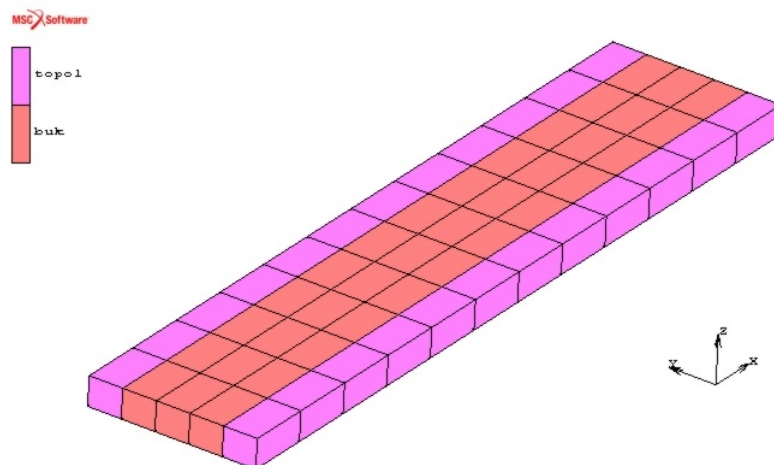
Byla realizována modální zkouška tří vzorků dřevěného jádra lyže (zobrazených na obr. 29c) o velikosti $400 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ za účelem zjištění prvních pěti frekvencí a jím příslušejícím vlastních tvarům kmitu modelu. Zmiňovaná dřevěná jádra byla po provedení této zkoušky následně použita pro výrobu zkušebních vzorků zjednodušených částí lyže (viz výše). Schéma sítě, čítající 36 měřících bodů, je zobrazeno na obr. 32.



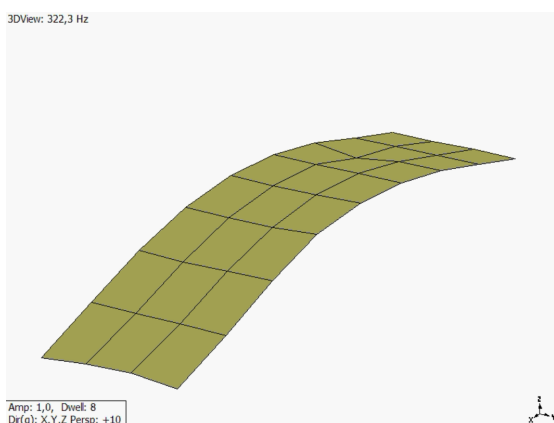
Obrázek 32: Schéma sítě vzorku pro modální analýzu.

Numerický model dřevěného jádra

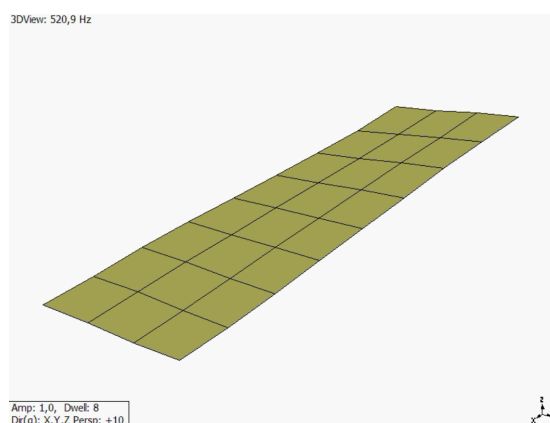
V závislosti na geometrii dřevěného jádra byl vytvořen odpovídající numerický model v programu MSC.Marc, na jehož konečno-prvkovou síť byly aplikovány objemové prvky typu hex8 (šestistěn) [29]. Model byl tvořen dvěma postranními pásy topolového dřeva o šířce 18 mm a třemi vnitřními pásy o celkové šířce 54 mm dřeva bukového a byl rozdělen na 100 elementů. Na obr. 33 je znázorněna materiálová skladba numerického modelu. Obr. 34 a 35 zobrazuje první čtyři vlastní tvary kmitu třetího vzorku dřevěného jádra a k němu příslušejícího numerického modelu.



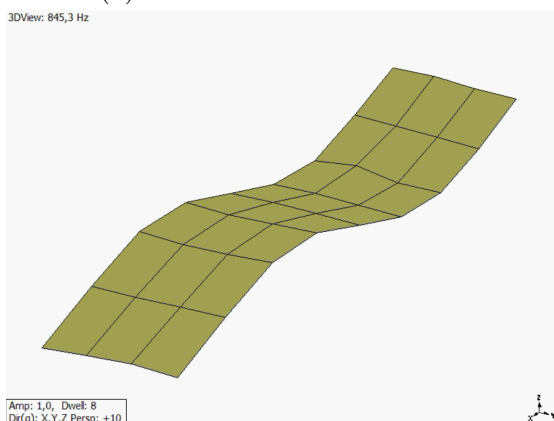
Obrázek 33: Numerický model dřevěného jádra lyže.



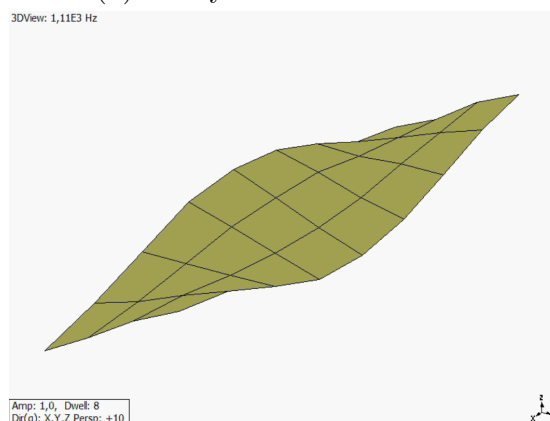
(a) První vlastní tvar kmitu.



(b) Druhý vlastní tvar kmitu.

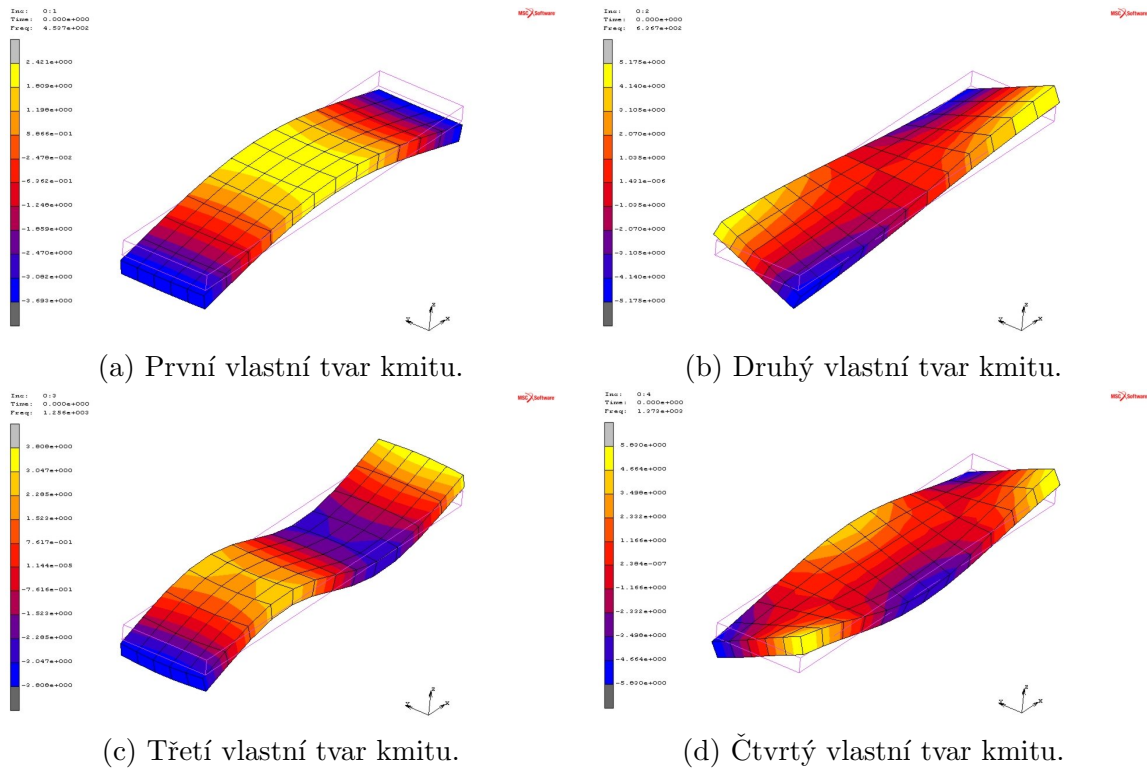


(c) Třetí vlastní tvar kmitu.



(d) Čtvrtý vlastní tvar kmitu.

Obrázek 34: První čtyři vlastní tvary kmitu dřevěného jádra.



Obrázek 35: První čtyři vlastní tvary kmitu numerického modelu dřevěného jádra.

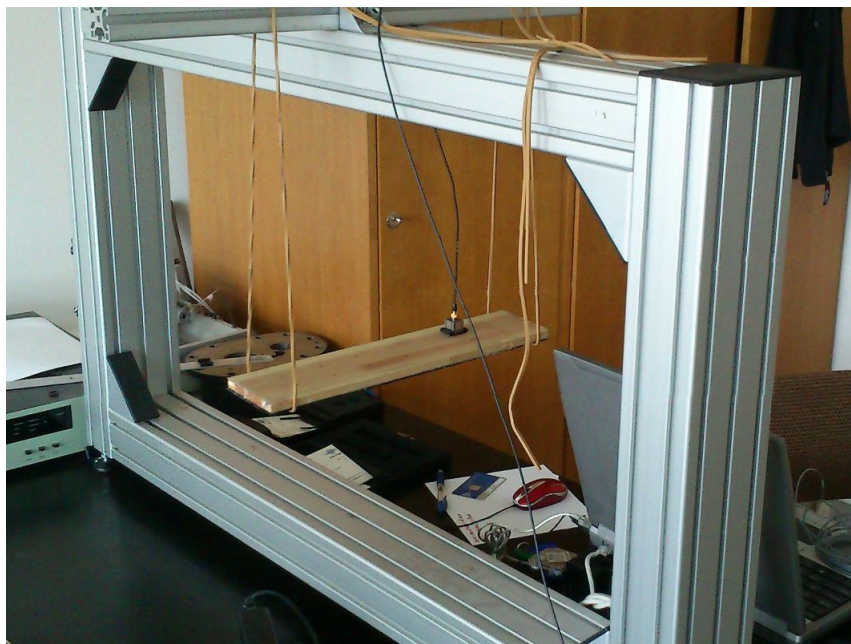
Porovnání prvních pěti vlastních frekvencí Ω_1 až Ω_5 reálného a numerického modelu včetně procentuální odchylky je znázorněno v tabulce 8. Na základě faktu, že odchylky vlastních frekvencí těchto modelů se pohybují do 10 % lze prohlásit, že dané experimentálně zjištěné materiálové charakteristiky topolového a bukového dřeva jsou použitelné pro další numerické výpočty v této práci.

Tabulka 8: Porovnání prvních pěti vlastních frekvencí [Hz] dřevěného jádra a numerického modelu.

	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	průměr	num. model	odchylka
Ω_1	287,5	292,8	280,1	286,8	270,7	5,9 %
Ω_2	392,0	401,5	410,7	401,4	387,7	3,5 %
Ω_3	743,5	755,1	737,8	745,5	773,5	3,6 %
Ω_4	874,5	880,1	892,2	882,3	852,3	3,5 %
Ω_5	1340,0	1350,0	1350,0	1346,7	1476,0	8,8 %

6.3 Modální analýza vyrobeného vzorku

Na všech třech vytvořených vzorcích zjednodušené části lyže byla provedena taktéž modální analýza za účelem zjištění prvních pěti frekvencí a jim příslušejícím vlastních tvarům kmitu modelu. Na vzorcích byla opět aplikována síť o 36 měřících bodech. Obr. 36 dokumentuje průběh dané zkoušky a tabulka 9 obsahuje výsledky modální zkoušky a průměrnou hodnotu jednotlivých vlastních frekvencí modelů.



Obrázek 36: Průběh modální analýzy.

Tabulka 9: Prvních pět vlastních frekvencí [Hz] vyrobených vzorků a jejich zprůměrovaná hodnota.

	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	průměr
Ω_1	319,2	325,3	322,3	322,3
Ω_2	492,6	518,6	520,9	510,7
Ω_3	835,8	850,9	845,3	844,0
Ω_4	1051,0	1112,0	1110,0	1091,0
Ω_5	1590,0	-	-	1590,0

Numerický model vzorku

Numerický model vzorku zjednodušené části lyže byl vytvořen v programu MSC.Marc. Pro zjištění nejlepší shody vlastních frekvencí numerického modelu s vlastními frekvencemi reálného vzorku byly na MKP síť použity postupně následující kombinace typů elementů:² [29]:

1. MKP1

objemové prvky typu hex8 (typ 7)

2. MKP2

objemové prvky typu hex8 (typ 7) + skořepinové prvky typu quad4 pro tlustostěnnou skořepinu (typ 75)

3. MKP3

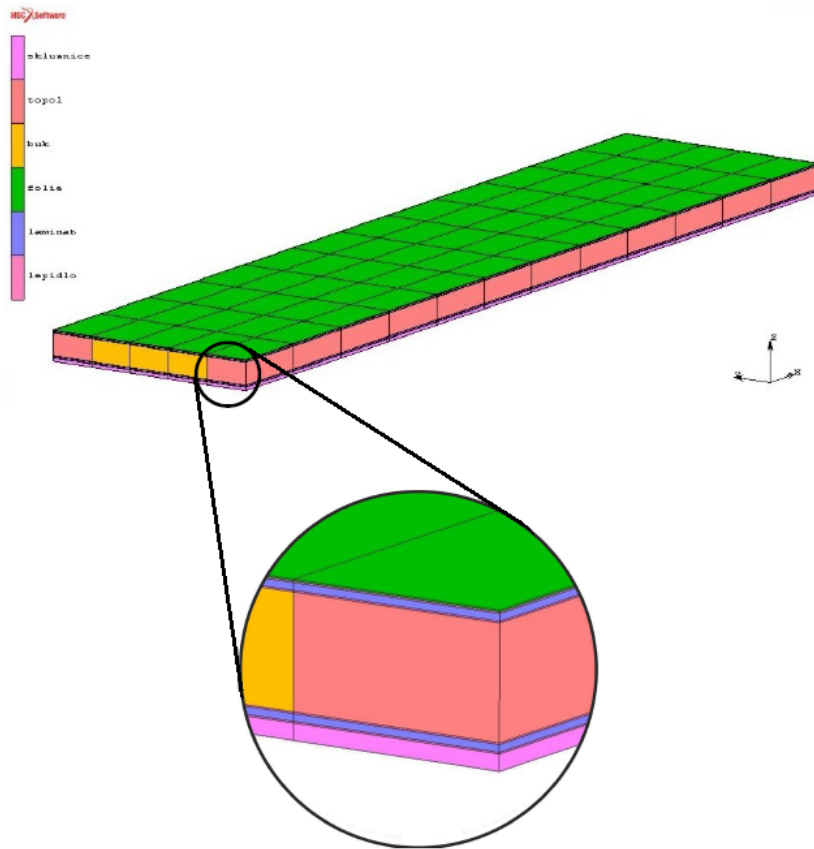
objemové prvky typu hex8 (typ 7) + skořepinové prvky typu quad4 pro tenkostěnnou skořepinu (typ 139)

Geometrie a materiálové složení vycházelo z reálného vytvořenému vzorku. Model, tvořený po šířce pěti prvky a po délce dvanácti prvky, byl složen z devíti vrstev, a to z pěti hlavních (fólie, dva pláty textilního kompozitu, dřevěné jádro a skluznice), které byly mezi sebou postupně propojeny vrstvami lepidla (čtyři vrstvy). Pro první jmenovaný typ použitých elementů byly všechny materiálové vrstvy tvořeny prvky objemovými, ve druhém a třetím případě byly tyto prvky aplikovány pouze na dřevěné jádro, jež bylo obepnuto dvěma vrstvami skořepinových prvků obsahující materiály ostatní.

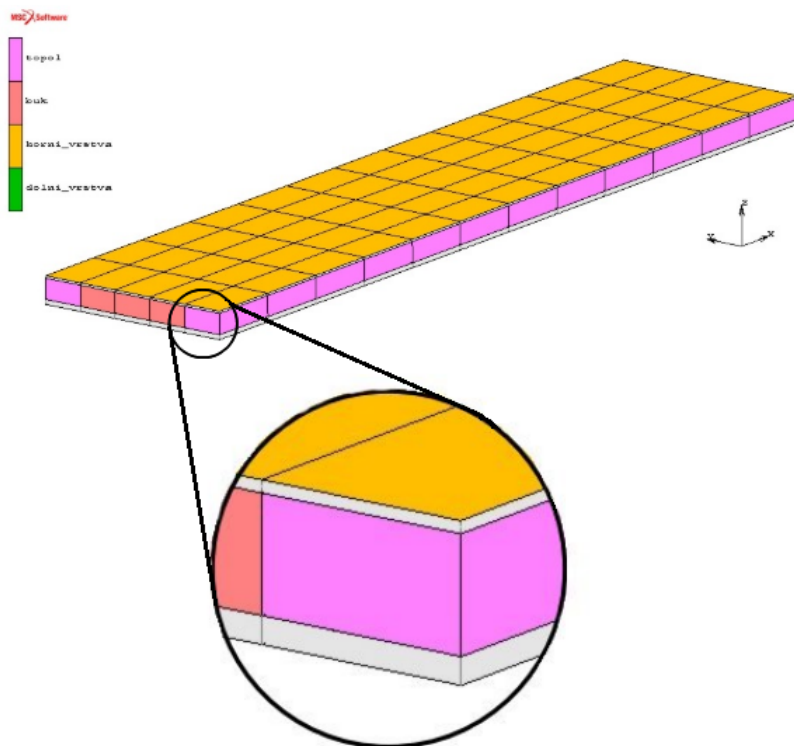
Na obr. 37 je znázorněn numerický model, na kterém byly použity elementy typu hex8. Obr. 38 potom ukazuje model, jehož dřevěné jádro je tvořeno elementy hex8 a na horní a spodní vrstvu materiálů byly aplikovány elementy quad4, kde šedivou barvou jsou znázorněny vyexpandované objemy skořepin.

Pro materiálové charakteristiky jednotlivých vrstev byly použity hodnoty určené experimentálně (viz tabulka 7) a k nim dopočítané veličiny v závislosti na povaze daného materiálu (viz tabulka 10).

²Základním rozdílem mezi tlustostěnnou a tenkostěnnou skořepinou je v zahrnutí vlivu smykových sil při numerických výpočtech. Tenkostěnné skořepiny jsou používány u prvků majících velmi malou tloušťku ve srovnání s minimálním poloměrem křivosti střednicové plochy. Tyto skořepiny uvažují Kirchhoffovu hypotézu tenkých desek a zanedbávají příčnou smykovou deformaci. O tlustostěnných skořepinách se hovoří v případě, že tloušťka skořepiny je srovnatelná s minimálním poloměrem křivosti plochy a u těchto skořepin Kirchhoffova hypotéza neplatí [36].



Obrázek 37: Parametrický model tvořený prvky hex8.



Obrázek 38: Parametrický model tvořený kombinací prvků hex8 a quad4.

Tabulka 10: Dourčené materiálové charakteristiky.

Elast. konstanty	Část lyže		
	Topol	Buk	Text. kompozit
E_{33} [MPa]	771	797	1942
G_{31} [MPa]	594	1343	1873
ν_{23}	0,1289	0,5447	0,1692
ν_{31}	0,0083	0,0397	0,0972

Tabulka 11 obsahuje prvních pět vlastních frekvencí jednotlivých numerických modelů s různými typy elementů s odchylkou od průměrných hodnot vlastních frekvencí skutečného vzorku.

Odchylka u první varianty se pohybovala do 9 %, u varianty druhé potom do 16 %. Na základě provedené analýzy lze konstatovat, že numerický model se zadanými experimentálně zjištěnými materiálovými charakteristikami (za použití adekvátních elementů) je dostatečně odpovídající modelu skutečnému a tyto materiálové konstanty je možné použít pro numerické simulace s dominantním ohybovým a krutovým namáháním.

Tabulka 11: Prvních pět vlastních frekvencí [Hz] jednotlivých modelů a procentuální odchylky od skutečného modelu.

	MKP1		MKP2		MKP3	
	frekvence	odchylka	frekvence	odchylka	frekvence	odchylka
Ω_1	329,2	2,2 %	341,3	5,9 %	337,2	4,6 %
Ω_2	501,8	1,8 %	552,0	8,1 %	534,1	4,6 %
Ω_3	912,1	7,5 %	944,5	11,9 %	1118,0	32,4 %
Ω_4	1062,3	2,7 %	1162,0	6,5 %	1797,0	64,7 %
Ω_5	1743,2	8,8 %	1845,0	16,0 %	1848,0	16,2 %

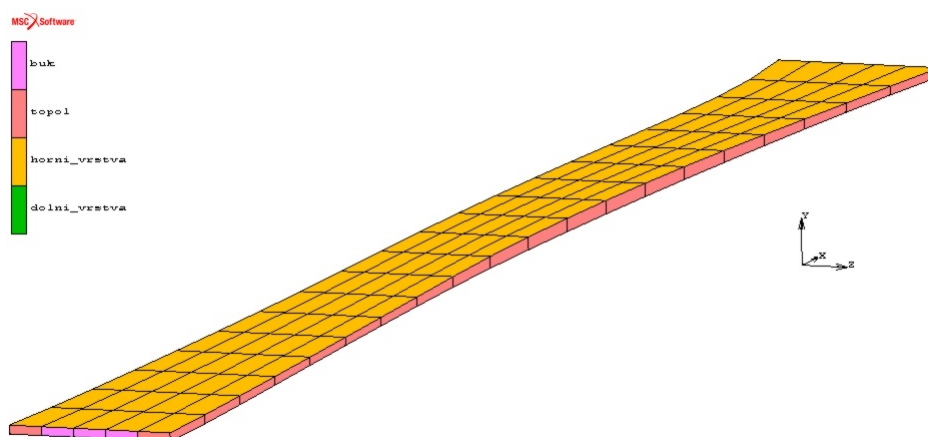
7 Optimalizace numerického modelu lyže

Tato kapitola se zabývá tvorbou numerického modelu lyže pro potřeby optimalizace, jejíž cílem bylo nalézt vhodnou kombinaci tloušťky a orientace potahů z textilního kompozitu obepínajících jádro za účelem maximalizace torzní tuhosti lyže a minimalizace její hmotnosti.

7.1 Numerický model lyže

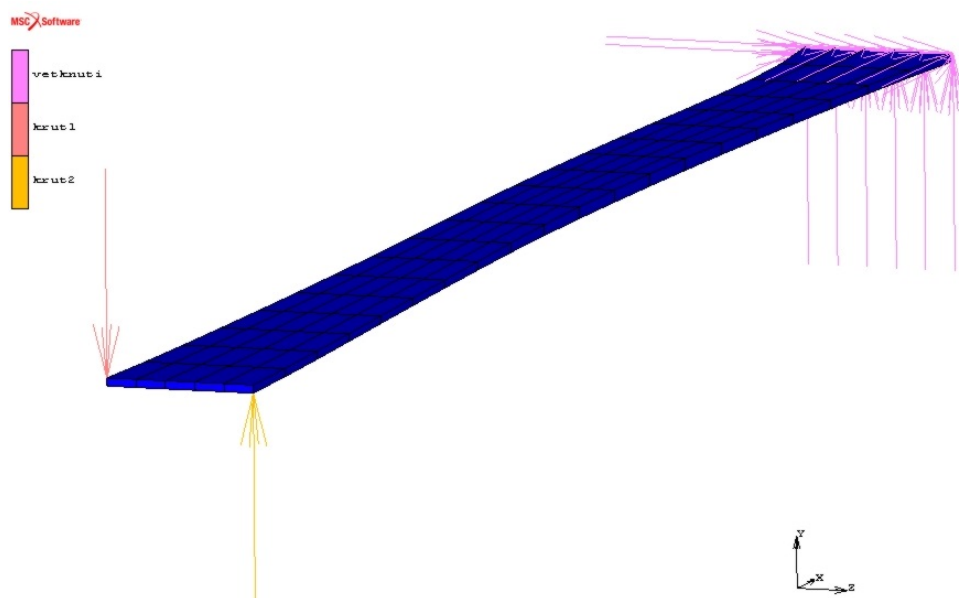
Aby bylo možné provést optimalizaci materiálové skladby sjezdové lyže dle zadaných požadavků firmy SPORTEM, bylo nutné lyži namodelovat a provést na ní danou mechanickou zkoušku. Numerický model, který byl vytvořen opět v programu MSC.Marc, vycházel z geometrie lyže IRIDIUM, jejíž délka činila 168 cm, s profilem 123-73-105 mm a rádiusem pohybujícím se mezi 12,1 a 14,6 m. Pro zjednodušení výpočtu byla zanedbána prohnutá špička a pata modelu. Materiálová skladba kopírovala strukturu zjednodušeného vzorku části lyže.

Na základě provedené analýzy modelů s různými typy elementů s přihlédnutím k problematice modelování konečno-prvkového modelu lyže a realizovatelnosti celé optimalizace byla lyže vytvořena pomocí kombinace objemových elementů s elementy skořepinovými pro tlustostěnnou skořepinu, tedy variantou MKP2. Na obr. 39 je vyobrazen numerický model lyže.



Obrázek 39: Numerický model lyže.

Okrajové podmínky pro simulaci v prostředí MSC.Marc vycházely z požadavků optimalizace, kterým byla maximalizace torzní tuhosti lyže. Lyže byla namáhána na krut, kde byl posuv zamezen ve všech směrech všech uzlů zadní části lyže a dvojice opačně orientovaných sil, vyvolávající kroutící moment, byla nasimulována dvěma bodovými silami působícími v krajních bodech špičky lyže. Každá síla měla velikost $F = 10$ N. Způsob zvolení okrajových podmínek pro tuto zkoušku je vidět na obr. 40.



Obrázek 40: Okrajové podmínky pro zkoušku krutem.

7.2 Optimalizace

Cílem optimalizace bylo nalézt vhodnou kombinaci vstupních parametrů, kterými byla orientace potahů z textilního kompozitu a jejich tloušťka za účelem minimalizace hmotnosti lyže a maximalizace torzní tuhosti lyže.

Vše probíhalo jako plně automatizovaná smyčka tří softwarů, a to výpočtového prostředí MATLAB [27], MKP programu MSC.Marc [29] a softwaru OptiSLang [30]. MATLAB zajišťoval generování skriptů se zpracováním vstupních a výstupních hodnot pro MSC.Marc, který sloužil jako konečno-prvkový řešič této úlohy. OptiSLang pak na základě vazby výsledků MKP modelu a vstupních hodnot řídil optimalizaci.

Optimalizovanými parametry, jak již bylo zmíněno, bylo natočení potahů z textilních kompozitů (úhel mezi osnovou a osou lyže) a tloušťka těchto vrstev. V modelu lyže byl uvažován dvouvrstvý vyvážený textilní kompozit s natočením jednotlivých vrstev $[A/-A]$, kde $A = \langle 0; 90 \rangle$ představovalo úhel ve stupních. Tloušťka kompozitu B , jež se v milimetrech pohybovala v rozmezí $B = \langle 0,1; 2 \rangle$, byla u každého potahu rozdělena do dvou vrstev o poloviční tloušťce. V současnosti se v modelu lyže IRIDIUM používá textilní kompozit o tloušťce 0,59 mm s natočením 0° .

V optimalizaci byla navržena objektivní funkce ve tvaru

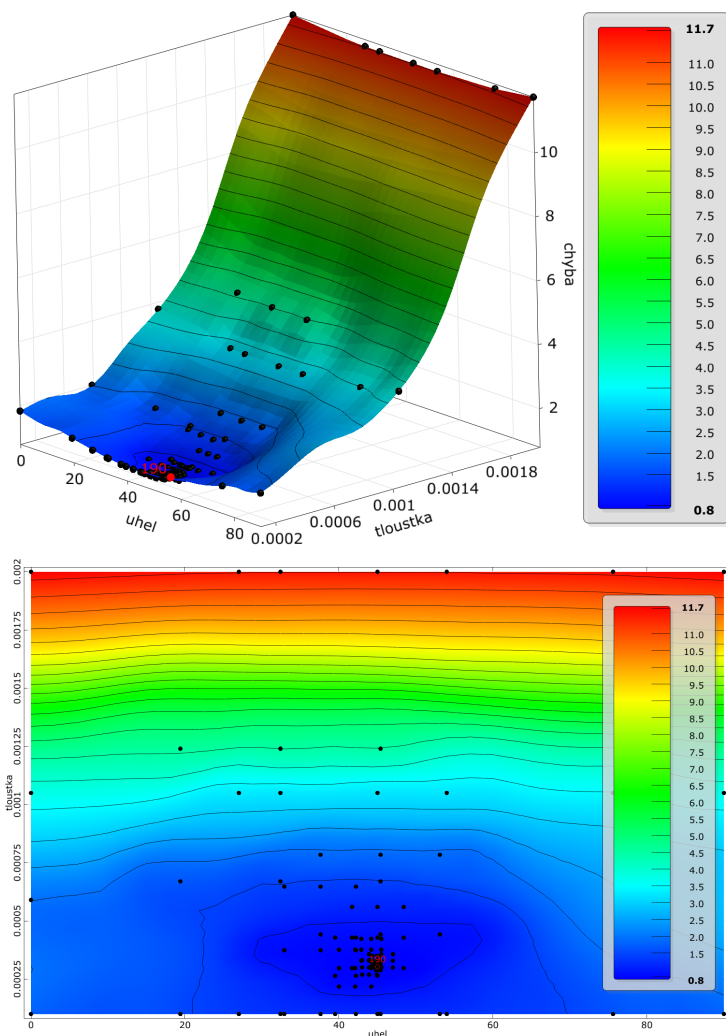
$$D = \left(\frac{v_1 - v_2}{v_{1p} - v_{2p}} \right)^2 + \left(\frac{t}{t_p} \right)^2, \quad (13)$$

kde v_{1p} a v_{2p} jsou posuvy krajních bodů špičky lyže ve směru osy y , ve kterých působí opačně orientované síly a t_p tloušťku při zadání počátečních reálných hodnot textilního kompozitu.

7.2.1 Výsledky optimalizace

Pro optimalizaci byla použita adaptivní metoda plochy odezvy ARSM (Adaptive Response Surface Method), jejíž algoritmus je následující: Nejprve jsou zvoleny startovací a opěrné (pomocné) body v aktuální oblasti a dochází k vyhodnocení situace v těchto bodech. Funkční hodnoty zmíněných bodů se aproximují lineárními či kvadratickými funkcemi a proběhne optimalizace této aproximace hledající optimum metodou gradientní, stochastickou či jejich kombinací. Následně jsou testována konvergenční kritéria mezi než patří například maximální počet iterací popř. minimální velikost momentálně zvolené oblasti. Nejsou-li podmínky splněny, v závislosti na poloze aktuálního (lokálního) minima je nalezena nová oblast. Proces se vrací do generování opěrných bodů a pokračuje do momentu splnění konvergenčních kritérií, kdy optimalizace končí. Za výsledek je považováno řešení, pro které objektivní funkce vykazuje nejnižší hodnotu [30].

Optimalizace dospěla po devatenácti iteracích k výsledku $A = 45,0^\circ$ a $B = 0,303$ mm. Na obr. 41 je vyobrazen graf aproximované chybové funkce a vizualizace jednotlivých spočtených opěrných bodů, kde zvýrazněný bod v sobě obsahuje informaci o optimální kombinaci vstupních parametrů (minimalizovaná chybová funkce zde nabývá nejnižší hodnoty).



Obrázek 41: Graf aproximované chybové funkce.

Tuhost lyže v krutu k_k lze vyjádřit podílem působícího kroučícího momentu M_k a úhlu natočení lyže α , kde tyto dvě veličiny lze jednoduše vyjádřit pomocí vztahů:

$$M_k = F \cdot R, \quad (14)$$

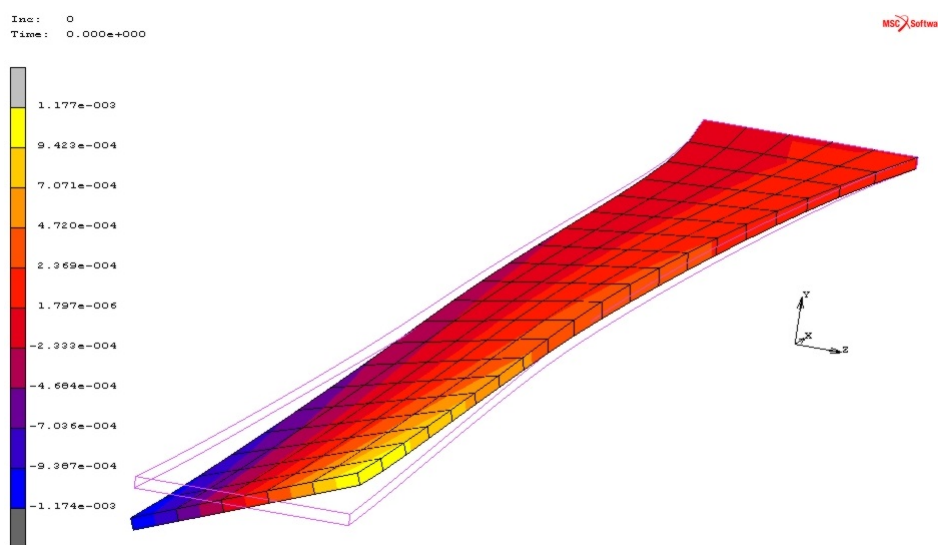
$$\alpha = \arctan\left(\frac{v_1 - v_2}{R}\right), \quad (15)$$

F představuje působící sílu v krajním bodě špičky lyže a $R = 123$ mm šířku špičky lyže.

Tabulka 12 porovnává hmotnost lyže a její tuhost v krutu při zadání počátečních hodnot natočení kompozitového potahu $A = 0^\circ$ s tloušťkou $B = 0,59$ mm a při uvažování hodnot, ke kterým dospěla optimalizace, tedy $A = 45,0^\circ$ a $B = 0,303$ mm. Bylo dosaženo snížení hmotnosti lyže o 17,5 % a zvýšení tuhosti krutu lyže o 39,8 %. Na obr. 42 je potom pro ukázkou vyobrazen výsledek krutové zkoušky s optimální kombinací natočení jednotlivých vrstev kompozitu $[45,0^\circ / -45,0^\circ]$ a tloušťkou potahu 0,303 mm. Hodnota posunutí levého krajního bodu špičky lyže v místě působící síly byla $v_1 = 1,177$ mm a posunutí v pravém bodu potom $v_2 = 1,174$ mm.

Tabulka 12: Porovnání referenčního stavu a optimalizovaného stavu.

	počáteční stav	optimalizovaný stav	zlepšení
m [kg]	1,395	1,187	17,5 %
k_k [Nm·rad ⁻¹]	46,067	64,398	39,8 %



Obrázek 42: Zkouška krutem s hodnotami posunutí v ose y při zadání výsledků optimalizace (deformace zvětšena 20×).

Je pochopitelné, že pro materiály, jež by disponovaly parametry získanými provedenou optimalizací (tloušťkou a natočením v lyži), by materiálové charakteristiky byly pravděpodobně odlišné než stávající experimentálně získané hodnoty. Dle variability výroby jednotlivých materiálů umožňují optimalizační metody v softwaru OptiSLang zahrnovat i jiné (další) vstupní parametry materiálů, jejichž rozmezí může být zadáváno intervalem hodnot či diskrétně.

8 Závěr

Diplomová práce se věnovala experimentální a numerické analýze mechanického chování struktury modelu sjezdové lyže s dřevěným jádrem a vrstvou laminátu s obchodní značkou IRIDIUM firmy SPORTEN. Za účelem experimentálního zjištění materiálových charakteristik dílčích materiálů této lyže byly realizovány statické zkoušky tahem a ohybem. Pomocí dodaných materiálů byl vyhotoven zjednodušený model části lyže, k němuž byl v programu MSC.Marc vytvořen odpovídající numerický model a na základě porovnání výsledků provedené modální analýzy obou modelů byly materiálové charakteristiky prohlášeny za použitelné pro numerické simulování s dominantním ohybovým a krutovým namáháním. V dalším kroku byla realizována optimalizace, jejíž hlavním cílem bylo nalézt ideální kombinaci tloušťky a natočení vrstev textilního kompozitu pro dosažení minimální hmotnosti a maximální tuhosti v krutu zjednodušeného modelu lyže IRIDIUM. Odpovídající numerický model byl sestaven v systému MSC.Marc, dílčí výpočty byly realizovány v prostředí MATLAB a optimalizace byla uskutečněna v softwaru OptiSLang. Nalezením optimální kombinace vstupních parametrů se podařilo snížit hmotnost lyže o 17,5 % a zvýšit její torzní tuhost o 39,8 %. Zmíněným postupem se podařilo splnit všechny zadané úkoly této práce.

Zjednodušený model části lyže byl vytvořen na základě dodaných materiálů a dle dostupných technických možností výroby. Pro model lépe korespondující strukturu lyže IRIDIUM by musely být k dispozici materiály s jinými specifickými rozměry a musel by být přesně dodržen technologický postup výroby lyže. Dále by bylo vhodné numerický konečno-prvkový model lyže více přizpůsobit geometrii a materiálovému složení reálné lyže.

Hlavním přínosem předkládané diplomové práce bylo určení požadovaných materiálových charakteristik jednotlivých vrstev struktury sjezdové lyže IRIDIUM a ověření jejich použitelnosti pro realizaci optimalizace modelu lyže dle daných požadavků firmy SPORTEN. Ukázalo se, že i s pomocí zjednodušeného modelu lze za použití numerických metod dosáhnout lepších mechanických vlastností lyže než při přiklonění se ke klasičtějšímu empirickému přístupu. Tato myšlenka snad povede k další spolupráci s výrobcí lyží, a tím ke zvýšení jejich konkurenceschopnosti jak v sektoru výroby sjezdových lyží pro běžné uživatele, tak ve speciálních hi-tech inovacích.

Literatura

- [1] *Active vibration damping of the alpine ski*, Austria, 2010. Scientific article, 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [2] Buchar J., Voldřich J.: *Identification of elastic properties of material of larger bodies*. Praha, 2002. 40th International conference experimental stress analysis.
- [3] Buchar J., Voldřich J.: *Numerical simulation of the wood response to the high velocity loading*. Praha, 2001. Dostupné z: <http://www.dynalook.com/european-conf-2001/NUMERICAL-SIMULATION-OF-THE-WOOD-RESPONSE-TO-THE.pdf>
- [4] *CARBONSTAR: Carbon* [online], 2011. Dostupné z: <http://www.carbonstar.cz/karbon.html>
- [5] Cease H., Derwent P.F, Diehl H.T, Fast J., Finley D.: *Measurement of mechanical properties of three epoxy adhesives at cryogenic temperatures for CCD construction*. 2006. Fermi National Accelerator Laboratory Batavia IL 60510. Dostupné z: <http://inspirehep.net/record/736549>
- [6] Čermák J.: *Výroba lyží v Čechách z hlediska materiálů a technologií v kontextu světového vývoje*. Praha, 2009. Absolventská práce. Vyšší odborná škola. Dostupné z: <http://www.carbonski.cz/wpcontent/uploads/2013/03/final.doc>
- [7] Daika A.: *Měření deformací pomocí digitální korelace obrazu*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] Da Silva L., Adams F.M. a R. D.: *Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures*. Portugal, 2004. University of Porto. Dostupné z: http://www.paginas.fe.up.pt/lucas/daSilva_JAST_2005.pdf
- [9] *DŘEVO centrum* [online], 2015. Dostupné z: <http://www.drevo.celyden.cz>
- [10] *ELAN SKI* [online], 2014. Dostupné z: <http://www.elanskis.com>
- [11] *Epoxidové pryskyřice: Letoxid LH-103*. Česká republika, 2010. Technický list.

- [12] Federolf P. A.: *Finite element simulation of a carving snow ski*, Zurich, 2005. Dissertation, Swiss federal institute of technology Zurich. Dostupné z: <http://www.e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:28070/eth-28070-02.pdf>
- [13] Filippi Oberegger U., Kaps P., Mössner M., Heinrich D., Nachbauer W.: *Simulation of turns with a 3D skier model*, Austria, 2010. 8th Conference of the International Sports Engineering Association. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [14] Forest Products Laboratory: *Wood handbook: Wood as an Engineering material*, centennial edition. Wisconsin: United States Department of Agriculture Forest Service, 2010. Dostupné z: <http://www.woodweb.com>
- [15] *Giving Ski Racers an Edge*, Switzerland, 2007. Institute for Snow and Avalanche Research. Dostupné z: <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resource-library/article/AA-V1-I1-Giving-Ski-Racers-Edge.pdf>
- [16] GoodFellow: All the materials you need for Scientific and Industrial Research and Manufacturing. *Polyamide: Material Information* [online]. 2008-14. Dostupné z: <http://www.goodfellow.com>
- [17] Halada A.: Jak Češi sportují a který sport je nejoblíbenější, *NA VZDUCHU.CZ* [online] 2009
- [18] Hirano Y., Tada N.: *Mechanics of turning snow ski*. Japan, 1993. Faculty of Science and Engineering, Chuo University. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [19] Holmberg S., Persson K., Petersson H.: *Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials*. Sweden, 1999. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [20] Chanderak G., Bhushans S., Thatte S., Kelkar A. D.: *On the Behavior of Fiberglass Epoxy Composites under Low Velocity Impact Loading*. USA, 2010. Tennessee Technological University. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/ame/2010/621406/>
- [21] Kaska S., Kapinus L.: *Měření modulu pružnosti*. České Budějovice, 2005. Fyzikální praktikum. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.

- [22] Kořínek Z.: *Vlákna pro kompozity*. Praha. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <http://www.mujiweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [23] Laš V.: *Mechanika kompozitních materiálů*, 2. přepracované vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta aplikovaných věd, 2008, 200s. ISNB 978-80-7043-698-9.
- [24] *Lyžování* [online], 2015. Dostupné z: <http://www.eshop.lyze-radotin.cz>
- [25] Marek P.: Jak lyže přicházejí na svět. *MM Průmyslové spektrum* [online] 2011. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/jak-lyze-prichazeji-na-svet.html>
- [26] Material Properties Database. *Mechanické vlastnosti dřev.* [online]. 2009-13 Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-data>
- [27] MatlabR2009a: *Help*, MathWorks.
- [28] Míka S.: *Matematická optimalizace*, 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta aplikovaných věd, 1997, 265 s. ISNB 80-7082-319-4.
- [29] MSC.Marc 2008r1: *Help*, MSC.Software.
- [30] OptiSLang 3.2.0: *Help*, Dynamic Software and Engineering.
- [31] Sosna I.: Lyžařské vybavení, *SNOW* [online] 2010. Dostupné z: <http://www.snow.cz>
- [32] *SPORTEN* [online], 2014. Dostupné z: <http://www.sporten.cz>
- [33] Špirit Z.: *Mechanické vlastnosti dřev.* Plzeň, 2010. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [34] Tanahashi R.: *Ski sliding mechanism*. Journal of Society Mechanical Engineering. 1992. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [35] *The Engineering ToolBox* [online] 2007. Dostupné z: <http://www.engineeringtoolbox.com>
- [36] *Tenké desky, tlusté desky, skořepiny.* [online]. Ostrava, 2009. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/ppsv/06.pdf>
- [37] Výzkumný a vývojový ústav dřevařský Praha: *Dřevo, fyzikální a mechanické vlastnosti, vady dřeva, vlhkost a sušení dřeva*. Praha, 2005. Dostupné z: <http://www.drevari.humlak.cz>

- [38] Walker A., Gibbs N., Leech L.: *The Encyclopedia Of Wood: A Tree-By-Tree Guide To The World's Most Versatile Resource*. 2.edition. USA: Checkmark Books, 2005. ISBN 978-0816061815.
- [39] *Wikipedia* [online], 2014. Dostupné z: <http://www.en.wikipedia.org>

Přílohy

Příloha v tištěné podobě obsahuje tabulku materiálových charakteristik dílčích materiálů, jež jsou používány při výrobě sjezdové lyže IRIDIUM a s nimiž byly porovnávány dané experimentálně získané materiálové charakteristiky dílčích složek lyže.

Všechny vytvořené programy jsou uloženy ve spustitelné formě na příloženém CD-ROMu. Adresáře jsou členěny souladu s jednotlivými kapitolami.

- **Diplomova práce**

Složka „Diplomova práce“ obsahuje výslednou práci ve formátu PDF.

- **Modely MSC.Marc**

Tato složka obsahuje podsložku **Drevene jadro**, která obsahuje numerický model dřevěného jádra lyže, dále **Zjednodusený model casti lyže** obsahující tři modely zjednodušené části lyže s různými typy elementů a poslední podsložkou je **Model lyže**, v níž je uložen model lyže použitý při optimalizaci.

- **Skripty optimalizace**

Složka s názvem „Skripty optimalizace“ zahrnuje veškeré skripty zajišťující spolupráci programu MSC.Marc a softwaru OptiSlang při optimalizaci.

Materiálové charakteristiky převzaté z publikací

Tabulka 13 shrnuje materiálové charakteristiky dílčích materiálů použitých v lyži převzatých ze zdrojů zmíněných v kap. 5 (str. 47). Hustota nevytvrzeného lepidla byla získána přímo od výrobce.

Tabulka 13: Materiálové charakteristiky převzaté z literatury.

Elast. konstanty	Část lyže					
	Topol	Buk	Text. kompozit	Fólie	Skluznice	Lepidlo
E [MPa]	-	-	-	1100	800	20000
ν	-	-	-	0,39	0,38	0,40
E_{11} [MPa]	9700	13700	38300	-	-	-
E_{22} [MPa]	890	2240	10560	-	-	-
G_{12} [MPa]	720	1610	3960	-	-	-
ν_{12}	0,3269	0,4465	0,2854	-	-	-
ρ [kg·m ⁻³]	380	750	1850	1150	940	1110