

Konstrukční návrh a design kompozitních lyží

Bc. Vojtěch Fuksa

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch Fuksa**
Osobní číslo: **T22378**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Konstrukční návrh a design kompozitních lyží**

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku kompozitních materiálů pro sportovní pomůcky – lyže, snowboardy, skateboardy, atd.
2. Přehled kompozitních materiálů, výztužní systémy, vlastnosti a použití.
3. Návrh kompozitní sendvičové konstrukce pro kompozitní lyže s využitím kompozitních materiálů.
4. Experimentální testování dle doporučení.
5. Návrh prototypu se zvolenou orientací výztuže a volba vláken, odůvodnění.
6. Vyhodnocení výsledků a formulace závěru.

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

Seznam doporučené literatury:

Barbero, Ever J., Introduction to composite materials design, Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group an informa business, Boca Raton, 2018.

ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ISBN 978-80-7454-015-8. 2011.

EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351s, ISBN 978-80-86960-29-6, 2009.

Jim Low, Yu Dong: Composite Materials: Manufacturing, Properties and Applications, Edition: 1st, Elsevier, ISBN 978-0128205129, 2021.

Jawaid Mohammad, Thariq Mohamed, Saba Naheed: Aging Mechanisms in Polymer Composite Materials. Elsevier, ISBN 978-0-08-102298-6, 2019.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na konstrukční řešení a výrobu sjezdových lyží se sendvičovou konstrukcí při využití kompozitních materiálů. Nejprve popisuje kompozitní materiály, jejich základní typy, rozdělení a technologie zpracování. Následně zkoumá využití kompozitních materiálů pro výrobu sjezdových lyží. V praktické části jsou vyrobeny sjezdové lyže pomocí dvou technologií výroby. Vyrobené lyže jsou podrobeny nedestruktivním zkouškám mechanických vlastností. Na závěr je porovnána kvalita vyrobených lyží zvolenými technologiemi.

Klíčová slova: kompozitní materiály, lyže, sendvičová konstrukce

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the design and production of skis with sandwich construction using composite materials. It describes composite materials, their types, distribution, and some common processing technologies. Further, it investigates the use of composite materials for the production of skis. In the practical part, the skis are produced by using two production technologies, and the produced skis are subjected to non-destructive tests of mechanical properties. The quality of the produced skis is compared.

Keywords: composite materials, skis, sandwich construction

Obrovské poděkování patří firmě LUSTi a zejména jednateři, panu Milanu Luštincovi za odborné rady, pomoc, věnovaný čas a velkou vstřícnost, bez které by nebylo možné tento projekt realizovat.

Za pomoc s testováním vyrobených lyží moc děkuji panu Michalu Malinovi z firmy KÄSTLE.

Děkuji univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně a Fakultě technologické za umožnění výroby lyží.

Děkuji Mirkovi Kašíkovi za půjčení dílny a nástrojů a pomoc při výrobě.

Moc děkuji mé rodině a kamarádům, kteří mě vždy plně podporovali, věnovali mi svůj čas a energii a jen díky nim jsem se mohl dostat tak daleko.

Dále děkuji vedoucí mé diplomové práce paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za její ochotu a pomoc při tvorbě celého projektu.

Poděkování patří také mé babičce Marii za finanční podporu tohoto projektu.

Motto

„My mama always used to tell me: 'If you can't find somethin' to live for, you best find somethin' to die for“

Tupac Amaru Shakur

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 HISTORIE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.2 DEFINICE KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	12
1.3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI	13
1.3.1 Homogenní a nehomogenní kompozity	15
1.4 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	16
1.4.1 Rozdělení dle velikosti částic výztuže	16
1.4.2 Rozdělení dle typu a tvaru výztuže	17
1.4.3 Rozdělení dle materiálu výztuže	20
1.4.4 Rozdělení dle materiálu matrice	23
1.4.5 Rozdělení dle disperzní fáze	26
2 ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	27
2.1 RUČNÍ LAMINACE	27
2.2 VAKUOVÁ INFUZE	29
2.3 KOMPRESNÍ FORMOVÁNÍ PREPREGŮ	30
2.4 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	31
2.5 NANÁŠENÍ SPREJEM	33
2.6 PULTRUZNÍ VÝROBA	34
2.7 NAVÍJENÍ	35
2.8 TRANSFEROVÉ LISOVÁNÍ (RTM)	36
3 SJEZDOVÉ LYŽE	38
3.1 SJEZDOVÉ LYŽOVÁNÍ	38
3.2 HISTORIE VÝROBY SJEZDOVÝCH LYŽÍ	38
3.3 TYPY SJEZDOVÝCH LYŽÍ	40
3.4 KONSTRUKCE SJEZDOVÝCH LYŽÍ	41
3.4.1 Sendvičová konstrukce lyže	44
3.4.2 Capová konstrukce lyže	45
3.4.3 Half – capová konstrukce lyže	46
3.4.4 Technologie camber a rocker	46
3.4.5 Délka a šířka lyže	48
3.5 MECHANICKÉ ZKOUŠKY SJEZDOVÝCH LYŽÍ	49
3.5.1 Měření pružnosti a torzní tuhosti dle ISO 5902	49

3.5.2	Měření indexu únavy pomocí cyklického ohybového namáhání dle normy ISO 6266	51
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	53
4	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	54
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ KOMPOZITNÍCH LYŽÍ	56
5.1	CHARAKTERISTIKA VYRÁBĚNÝCH LYŽÍ.....	56
5.2	MATERIÁLY POUŽITÉ NA VÝROBU LYŽÍ.....	56
5.2.1	Jádro.....	57
5.2.2	Sklužnice.....	58
5.2.3	Hrany	59
5.2.4	Kompozitní tkaniny	60
5.2.5	Výztuž.....	61
5.2.6	Vrchní fólie (Topsheet).....	62
5.2.7	Výztuže pro špičky a paty.....	62
5.2.8	Výplň	63
5.2.9	Gumové tlumicí pásky	64
5.2.10	Epoxidová pryskyřice	64
5.3	SENDVIČOVÁ KONSTRUKCE LYŽE.....	65
6	TECHNOLOGIE VÝROBY 1 - VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU.....	66
6.1	VÝROBA FORMY.....	66
6.2	KLADENÍ JEDNOTLIVÝCH VRSTEV SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE.....	71
6.3	ZABALENÍ DO VAKUOVÉHO PYTLE	72
6.4	VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU	73
6.4.1	Nastavení programu autoklávu.....	74
6.5	FINÁLNÍ OPRACOVÁNÍ	75
7	TECHNOLOGIE VÝROBY 2 – ZPRACOVÁNÍ VE VYHŘÍVANÉM LISU.....	78
7.1	OZNAČENÍ VYROBENÝCH LYŽÍ PRO PŘEHLEDNOST	80
8	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	81
8.1	ZKOUŠKA PRUŽNOSTI LYŽE.....	81
8.2	ZKOUŠKA TORZNÍ TUHOSTI LYŽE	84
9	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	87
9.1	VÁHA LYŽÍ.....	87
9.2	VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	87
9.3	VYHODNOCENÍ VIZUÁLNÍ KVALITY	88
9.3.1	Kvalita povrchu	88
9.3.2	Vady.....	88
9.3.3	Uložení biaxiálních prepregových vrstev	89
9.4	POROVNÁNÍ VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ	90

ZÁVĚR	91
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	94
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	98
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	100
SEZNAM TABULEK	103

ÚVOD

Kompozitní materiály jsou dnes nedílnou součástí technologického světa a nacházejí uplatnění v široké škále odvětví od automobilového průmyslu, přes letectví, kosmický průmysl až po biomedicínu. Jejich skvělé mechanické vlastnosti při zachování nízké hmotnosti a jednoduchosti výroby jsou bezesporu takovými výhodami, které budou v budoucnosti technologického průmyslu stále hrát velmi důležitou roli, tak jako hrají dnes. Od uvedení moderních kompozitních materiálů do povědomí širší veřejnosti a stále se zvyšujícího využívání, začaly kompozitní materiály zcela měnit a definovat možnosti v mnoha již zmíněných odvětvích. A není tomu jinak ve sportovním odvětví. Sportovní vybavení prošlo za několik posledních let výrazným progresem, co se týče snížení váhy při zlepšení požadovaných mechanických vlastností. Od hokejových holí, přes oštěpy, tenisové rakety, surfová prkna až po sjezdové lyže. A právě použitím kompozitních materiálů pro konstrukci sjezdových lyží se zabývá tato diplomová práce.

Teoretická a tedy první část diplomové práce se nejprve zaměří na celkové téma kompozitních materiálů, tedy jejich základní popis, rozdělení, vlastnosti a využití. Následuje kapitola, která pojednává o zpracování kompozitních materiálů, používanými technologiemi a jejich aplikací. Kapitola třetí je věnována sjezdovým lyžím, historii jejich výroby, typům, použití, konstrukčním řešení a používaným materiálům.

Praktická a tedy druhá část se věnuje výrobě sjezdových lyží při použití kompozitních materiálů. Nejprve objasňuje cíl práce – definuje jednotlivé úlohy a problémy, které bude řešit, dále řeší konstrukční návrh lyží, výběr vhodných materiálů a metod výroby, dále probíhá dokumentace samotné výroby lyží, a následují vybrané mechanické zkoušky vyrobených lyží a porovnání dosažených výsledků s požadovanými hodnotami ve vztahu k určenému použití.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

1.1 Historie kompozitních materiálů

Cesta kompozitních materiálů od pradávna až po moderní dobu ukazuje vývoj technologie a její aplikace v různých oborech. Počátky využívání kompozitních materiálů sahají až do roku 1500 před naším letopočtem, kdy Egypťané a Mezopotámci mísili slámu s hlínou, která sloužila k výstavbě odolných budov a tak položili první základy kompozitních materiálů.

Jak dějiny pokročily, tak pokročil i vývoj kompozitních materiálů a velký podíl na tom mělo nutné zlepšování ve vojenských aplikacích. Kolem roku 1200 před naším letopočtem vynalezli mongolové první kompozitní luk, kdy za pomoci zvířecího lepidla, kosti a dřeva vyrobili zbraň, která později výrazně přispěla k jejich válečným úspěchům.

Výrazná expanze kompozitních materiálů nastala během a po druhé světové válce, kdy požadavky války vedly k rychlému vývoji a aplikaci těchto materiálů. Kolem roku 1945 došlo k vynalezení skleněných vláken a to byl jeden ze zásadních momentů pro kompozitní materiály, jelikož s tímto objevem se začaly dostávat do povědomí širší veřejnosti a otevřely se obrovské možnosti využití.

Během padesátých a šedesátých let dvacátého století se kompozity začaly používat v automobilovém a námořním průmyslu. Následovalo objevení uhlíkových vláken a aplikace nanotechnologií počátkem dvacátého prvního století. Tyto inovace vedly k vývoji kompozitů s vylepšenými mechanickými, tepelnými a elektrickými vlastnostmi, a tím se rozšířily možnosti použití napříč odvětvími.

V dnešní době se zaměření přesunuje k udržitelnému rozvoji, tedy důrazu na nahrazení syntetických vláken pro posílení kompozitů za vlákna přírodní. Tento posun je motivován požadavky na materiál, který nemá být pouze vysokovýkonný, ale také ekologicky šetrný k přírodě. [1]

1.2 Definice kompozitního materiálu

Kompozitní materiály nebo také kompozity jsou sdružené materiály, složené fyzikálním spojením dvou nebo více fází. Tyto fáze se mohou výrazně lišit svými mechanickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Jedná se tedy o kombinaci dvou rozdílných materiálů, které dávají vzniknout zcela novému materiálu se zcela novými vlastnostmi. Pro dvoufázový kompozitní materiál platí, že jedna fáze je spojitá, nazývaná matrice, která plní

funkci pojiva a je zpravidla poddajnější a druhá disperzní fáze je nespojitá, nazývaná také výztuž, která je tvrdší.

Proto, aby mohl být materiál označován jako kompozitní materiál, je zapotřebí, aby splňoval určitá kritéria.

Tyto kritéria jsou:

- Nespojitá fáze, tedy výztuž, musí být pevnější a tužší než fáze spojitá, tedy matrice
- Minimální podíl výztuže je 5% a více
- Kompozitní materiál musí být kombinací více složek
- Vlastnosti jednotlivých složek kompozitního materiálu musejí být odlišné
- Kombinací složek vznikne materiál o lepších požadovaných vlastnostech, než kterými disponují jednotlivé složky

Tyto kritéria vymezují definování kompozitních materiálů a z toho důvodu nelze za kompozit považovat například plast doplněný oxidy nebo přísady barviv. [2, 4, 6]

1.3 Základní vlastnosti

Tvorbou kompozitů se snažíme docílit zlepšení vlastností, kterými jednotlivé složky disponují či dokonce vytvořit zcela nové vlastnosti.

Jedná se hlavně o tyto vlastnosti materiálu:

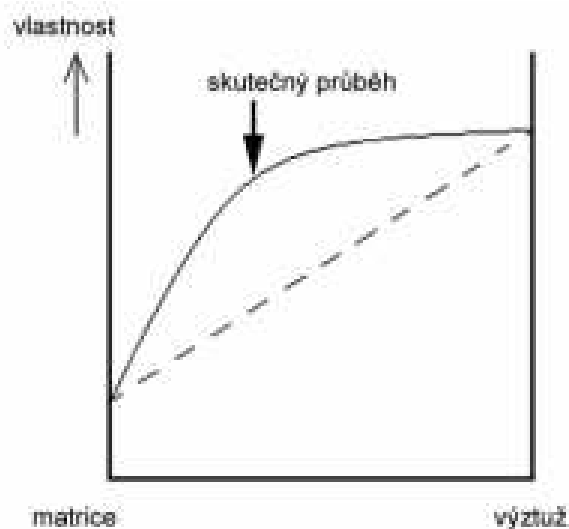
- Vysoká pevnost
- Vysoká tuhost
- Nízká hustota
- Chemická odolnost
- Odolnost vůči korozi
- Schopnost tlumit vibrace
- Vysoká tepelná vodivost
- Malý elektrický odpor
- Vysoká odolnost proti opotřebení

- Odolnost vůči tření
- Odolnost vůči tečení
- Odolnost vůči únavě

Parametry ovlivňující tyto vlastnosti se týkají jejich struktury nebo mezifázových vztahů a jedná se o:

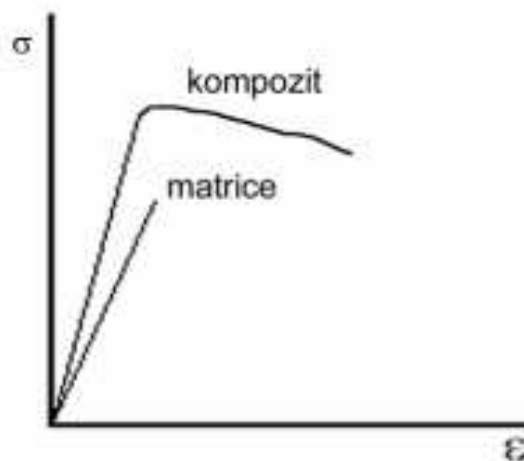
- Soudržnost matrice a výztuže
- Vzájemnou interakci mezi jednotlivými fázemi a složkami
- Geometrii vyztužení (velikost, tvar, uspořádání)
- Koncentraci/objem složek

Nejvýznamnější výhodou kompozitních materiálů je vlastnost zvaná synergismus. Pojem synergismus znamená, že výsledné vlastnosti kompozitního materiálu převyšují pouhé sečtení vlastností jednotlivých složek. Takto lze dosáhnout materiálů se zcela novými a výjimečnými vlastnostmi. [2, 3, 6]



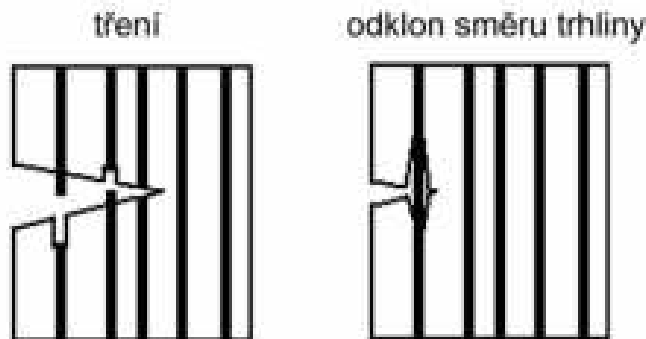
Obrázek 1 Synergické chování složek kompozitního materiálu [5]

Ukázkovým příkladem synergického chování může být například kombinace keramické matrice (Al_2O_3), která je vyztužena keramickými vlákny (SiC). I přesto, že jak matrice, tak výztuž jsou samy o sobě křehké, výsledný materiál je houževnatý, tedy odolává náhlému křehkému porušení (znázornění porovnání tahových diagramů na obrázku 2). [5]



Obrázek 2 Porovnání tahového diagramu křehké matrice a kompozitu sestávajícího z této matrice a křehkých keramických vláken [5]

Toto chování je způsobeno brzděním lomové trhliny na rozhraní matrice a vláken. Dochází k odklonění směru, ve kterém se trhlina šíří a tření mezi maticí a vlákny. Velkou roli na vlastnosti tedy hraje kvalita rozhraní mezi výztuží a maticí. [5]



Obrázek 3 Šíření trhliny na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu [5]

1.3.1 Homogenní a nehomogenní kompozity

Úzce spjata s vlastnostmi kompozitů je homogenita a nehomogenita materiálu. Jedná se o rovnoměrnost rozložení jednotlivých složek v materiálu a s tím spojené rozdílné vlastnosti v různých částech materiálu. [3]

- Homogenní kompozitní materiály – mají jednotnou strukturu, kde jsou jednotlivé složky rozptýleny rovnoměrně po celém objemu materiálu. Výsledkem je materiál, jehož vlastnosti jsou konzistentní v každém bodě. Takovéto materiály jsou často vytvářeny metodami, které zajišťují rovnoměrné rozložení složek, jako je třeba

dokonalé promíchání. Mezi homogenní kompozity patří například směs plastu s jemně rozptýlenými keramickými částicemi, které zlepšují tepelnou vodivost bez změny základních vlastností polymeru. [3]

- Nehomogenní kompozitní materiály – obsahují složky, které nejsou rovnoměrně rozloženy, což vytváří materiál s různými vlastnostmi v různých oblastech materiálu. Takovéto materiály mohou mít vrstvenou strukturu nebo obsahovat vlákna či částice, které jsou distribuovány tak, aby cíleně zlepšili vlastnosti materiálu v určitých směrech nebo oblastech. Příkladem nehomogenního kompozitního materiálu může být vláknem posílený kompozit – sklolaminát, kde skleněná vlákna poskytují zvýšenou pevnost v tahu, zatímco pryskyřice váže vlákna dohromady a přenáší napětí mezi nimi. [3]

1.4 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se dělí do několika kategorií podle určitých kritérií. Může se jednat o typ matrice, geometrické uspořádání, orientace vláken, či použité technologie. Zde jsou hlavní kategorie, podle kterých dělíme kompozitní materiály:

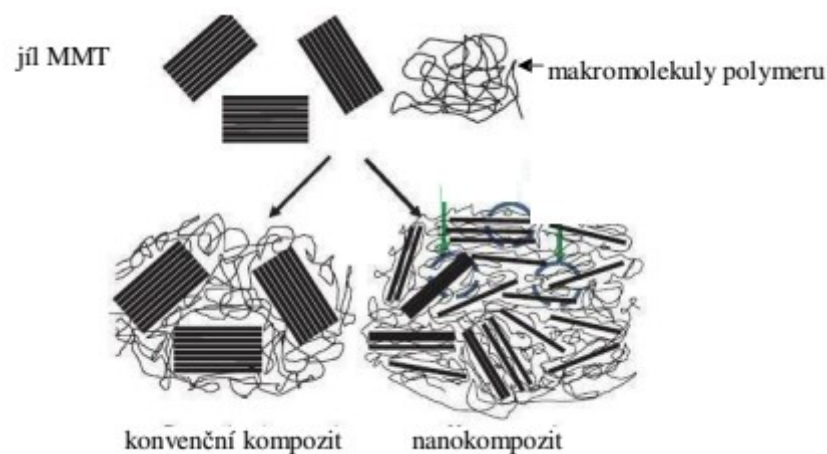
- Rozdělení dle velikosti částic výztuže,
- rozdělení dle druhu (materiálu) výztuže,
- rozdělení dle druhu matrice,
- rozdělení dle disperzní fáze,
- rozdělení dle typu a tvaru výztuže. [5, 7]

1.4.1 Rozdělení dle velikosti částic výztuže

Dle příčných rozměrů výztuže označujeme kompozitní materiály jako mikrokompozity, makrokompozity nebo nanokompozity.

- Mikrokompozity, které mají rozměr výztuže okolo 1-100 mikrometrů nacházejí největší využití v průmyslové výrobě. V porovnání s tradičními kovy dosahují menší hustoty, větší měrné pevnosti a měrného modulu. Použití pro vysoce přesné konstrukční díly se specifickými vlastnostmi, speciální obaly a izolátory pro elektrické zařízení.

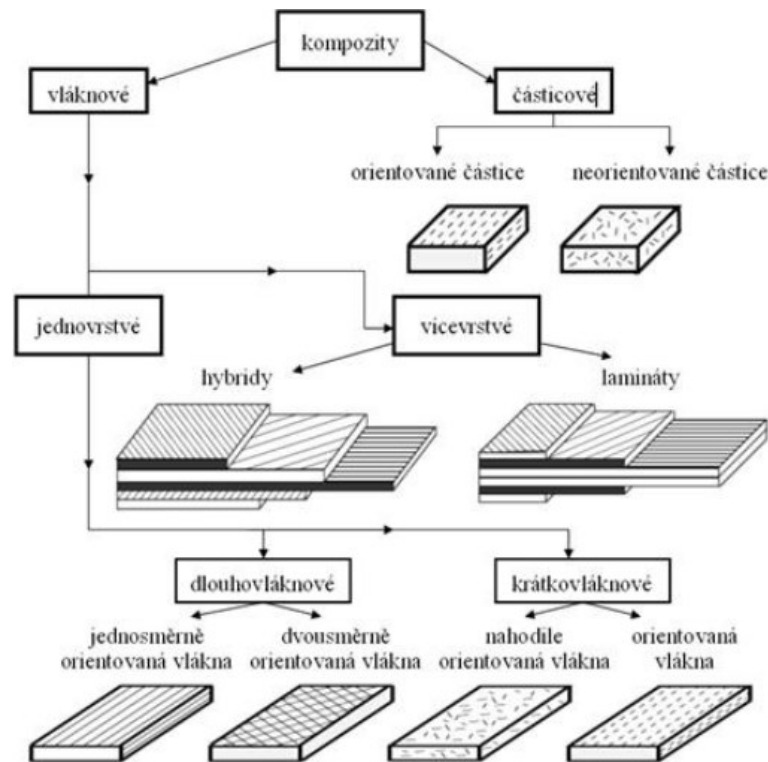
- Makrokompozity mají velikost částic větší než sto mikrometrů a nejčastěji najdou uplatnění ve stavebním průmyslu pro nosné konstrukce a nosní prvky, v automobilovém a leteckém průmyslu pro karosérie vozidel nebo trupy letadel a také ve sportovním průmyslu, například pro výrobu lyží a kol.
- Nanokompozity využívají částic nebo vláken o velikosti menší než jeden mikrometr, tedy v nanometrových rozsazích. Jelikož jsou velmi malé částice velmi jemně rozloženy po celém objemu materiálu, dochází k značnému vylepšení požadovaných vlastností. Využití nanokompozitů je možné v biomedicině jako implantáty nebo nosiče léčiv, jako polovodiče, senzory nebo displeje, solární panely nebo palivové články. [6, 7]



Obrázek 4 Rozdíl mezi mikrokompozitem (vlevo) a nanokompozitem (vpravo) s výztuží na bázi destičkových částic jílu [6]

1.4.2 Rozdělení dle typu a tvaru výztuže

Dle typu a tvaru výztuže se kompozity dělí na vláknové nebo částicové. Částicové kompozity se dále dělí na ty s orientovanými částicemi a na ty s neorientovanými částicemi. Vláknové kompozity se dělí na více skupin a těmi jsou jednovrstvé nebo vícevrstvé kompozity. Vícevrstvé poté mohou být hybridní nebo laminátové. Jednovrstvé kompozity se dělí na dlouho-vláknové (které mohou být buďto s jednosměrně orientovanými vlákny či dvousměrně orientovanými vlákny) a krátko-vláknové (a ty jsou buďto s nahodile orientovanými vlákny nebo s orientovanými vlákny). [7]



Obrázek 5 Schématické rozdělení kompozitních materiálů [7]

1.4.2.1 Částicové kompozity

Částicové kompozity obsahují pevné částice rozptýlené v matrici, které mohou být buď orientované, nebo neorientované.

- Orientované částice - jsou uspořádány ve specifickém vzoru nebo směru a zlepšují specifické vlastnosti materiálu, například tepelnou vodivost nebo elektrickou vodivost.
- Neorientované částice - jsou distribuovány náhodně a zvyšují obecnou pevnost a tuhost materiálu. Používají se v mnoha průmyslových aplikacích, kde jsou požadovány zlepšené mechanické vlastnosti. [2, 7]

1.4.2.2 Vláknové kompozity

Vláknové kompozity jsou materiály zpevněné vlákny, které mohou být orientovány nebo neorientovány v matrici. Tato vlákna mohou být například skleněná, uhlíková nebo aramidová. Dělí se na jednovrstvé a vícevrstvé.

Jednovrstvé kompozity

Jsou tvořeny jednou vrstvou zpevňujících vláken, která jsou obvykle uspořádána v jednom směru. Tento směr může být libovolný, ale obvykle je zvolen tak, aby co nejvíce odpovídal očekávanému zatížení. Mají vysokou pevnost a tuhost ve směru vláken, ale mohou být křehké vůči zatížení působícímu kolmo na směr vláken. Jsou optimalizovány pro specifické aplikace, kde je předpokládáno zatížení dobře definované a nepředpokládá se významné zatížení v jiných směrech.

- Dlouho-vláknové kompozity obsahují dlouhá vlákna, která poskytují velkou pevnost a jsou vhodná pro strukturální aplikace, kde jsou vysoké nároky na tahovou pevnost.
 - Jednosměrně orientovaná vlákna - jsou rozmístěna ve stejném směru a poskytují maximální pevnost a tuhost ve směru vláken. Používají se v aplikacích, kde je potřebná vysoká odolnost proti tahovému napětí v jednom směru, jako jsou například ložiska nebo křídla letadel.
 - Dvousměrně orientovaná vlákna - jsou rozmístěna ve více směrech a zvyšují odolnost materiálu proti silám působícím z různých směrů. Používají se v aplikacích vyžadujících rovnoměrně rozloženou pevnost, jako jsou sportovní vybavení nebo automobilové díly.
- Krátko-vláknové kompozity obsahují krátká nebo nahodile orientovaná vlákna, která jsou méně odolná než dlouho-vláknové kompozity, ale snadněji se zpracovávají a jsou vhodná pro složité tvary a sériovou výrobu.
 - Nahodile orientovaná vlákna – v těchto kompozitech jsou krátká vlákna rozmístěna náhodně a bez preferované orientace v matici. Takto náhodná orientace poskytuje materiálu více uniformní vlastnosti, ale obecně jsou tyto vlastnosti horší ve srovnání s kompozity s orientovanými vlákny. Materiál má tendenci být odolnější vůči zatížení z různých směrů, ale jeho pevnost a tuhost jsou obecně nižší. Výhodou je snadná zpracovatelnost, což umožňuje využití při vstřikování nebo lití při výrobě složitých tvarů. Typické aplikace zahrnují automobilové komponenty, jako jsou palubní desky nebo různé druhy krytů a obalů.
 - Orientovaná vlákna - krátká vlákna jsou orientována preferovaným směrem, který může být dosažen procesem, jako je extruze nebo tažení. Orientace vláken zvyšuje pevnost a tuhost materiálu v tomto směru. Tyto kompozity

jsou odolnější proti zatížení ve směru orientace vláken, ale mohou zůstat slabší v ostatních směrech. Takovéto materiály jsou často využívány v aplikacích, kde je potřeba specifická mechanická odolnost ve směru zatížení, například v konstrukčních komponentech, které jsou vystaveny tahovým nebo ohybovým silám v předvídatelných směrech.

Krátko-vláknové kompozity jsou výhodné kvůli své snadné zpracovatelnosti a schopnosti vyrábět složité geometrické tvary, což je zvláště užitečné v automobilovém průmyslu a ve výrobě spotřebičů. Navíc krátko-vláknové kompozity mohou nabízet zlepšenou odolnost vůči nárazu a lepší distribuci zatížení přes materiál, díky jejich kratší délce a potenciální interakci mezi vlákny a maticí.

[2, 6, 7]

Vícevrstvé kompozity

- Hybridy - Jsou kombinací různých typů vláken nebo matic, což umožňuje vytvoření materiálu s přizpůsobenými vlastnostmi. Používají se v aplikacích, kde jsou požadovány specifické kombinace vlastností, jako je odolnost vůči opotřebení a pevnost.
- Vícevrstvé lamináty - složené z několika vrstev s různou orientací vláken nebo typy materiálů, poskytují komplexní vlastnosti a jsou ideální pro aplikace, kde jsou vyžadovány víceosé vlastnosti.
- Jednovrstvé lamináty - jsou tvořeny jedním typem kompozitního materiálu a mohou být použity v situacích, kde je potřeba specifická vlastnost (např. pevnost nebo izolace) v jedné rovině. [2, 6, 10]

1.4.3 Rozdělení dle materiálu výztuže

Úlohou výztuže v kompozitním materiálu je především zvýšení mechanických vlastností samotné matrice. Nejčastější forma, ve které se výztuž vyskytuje, jsou vlákna nebo svazky vláken. Tato vlákna a svazky vláken se samostatně standardně nepoužívají, ale jsou uspořádány do specifické formy, nazývané tkanina, z důvodu jejich efektivního zpracování. Různá vlákna použitá v těchto materiálech mají odlišné vlastnosti, které ovlivňují celkové vlastnosti kompozitu.

Nejčastější výztuže pro sportovní využití jsou následovné:

- Uhlíková výztuž
- Skleněná výztuž
- Aramidová výztuž

[2,3]

1.4.3.1 Uhlíková výztuž

Uhlíkové výztuže představují klíčovou součást moderních kompozitních materiálů a mají široké uplatnění v různých odvětvích průmyslu. Tyto výztuže jsou tvořeny uhlíkovými vlákny nebo uhlíkovými nanotrúbkami a nabízejí řadu výhod.

Výhody uhlíkových výztuží zahrnují jejich vysokou pevnost a tuhost, což umožňuje vytvářet velmi pevné konstrukce. Dále mají extrémně nízkou hmotnost, což je činí ideální volbou pro aplikace, kde je snížení hmotnosti klíčové, jako například v leteckém nebo automobilovém průmyslu. Uhlíkové výztuže jsou také odolné vůči korozním procesům a chemikáliím a mají vynikající tepelnou stabilitu, což je dělá vhodnými pro aplikace vysokoteplotních a tepelně namáhaných prostředí.

Nicméně, mezi nevýhody uhlíkových výztuží patří vysoké náklady spojené s jejich výrobou a jejich poměrná křehkost při nárazech, což může zvýšit riziko poškození materiálu.

V praxi jsou uhlíkové výztuže široce využívány v automobilovém průmyslu pro výrobu lehkých a pevných karosérií, ráfků kol a dalších struktur vozidel. Také jsou důležitou součástí leteckého a kosmického průmyslu, kde se používají pro výrobu konstrukcí letadel, družic a raketoplánů. Dále jsou hojně využívány v oblasti sportovního vybavení, jako jsou tenisové rakety, golfové vybavení a cyklistické rámy.

Celkově lze říci, že uhlíkové výztuže představují nenahraditelný prvek moderních kompozitních materiálů, které nabízejí vynikající mechanické vlastnosti a umožňují vytvářet lehké a zároveň pevné konstrukce pro různé aplikace v průmyslu, sportu a technice.

[17, 18]

Rozdělení uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna jsou rozdělena do dvou hlavních skupin podle jejich mechanických charakteristik:

- Uhlíková vlákna s nižšími parametry mechanických vlastností – vyznačují se pevností v tahu nižší než 1000 MPa a modulem pružnosti v tahu nižším než 100 GPa. Tato vlákna jsou často využívána jako tepelná izolace, nebo jako výztuž do betonu a také jsou úspěšně používána k elektromagnetickému stínění.
- Uhlíková vlákna s vysokými parametry mechanických vlastností - tyto vlákna dosahují pevnosti v tahu mezi 3,5 až 7 GPa a modulu pružnosti v tahu v rozmezí 230 až 930 GPa. Jsou vyráběna zejména z polyakrylonitrilu (PAN) a jsou považována za technologicky vyspělá. Dělí se do skupin dle jejich pevnosti v tahu a pružnosti na:
 - vysoce pevná vlákna (HT fibers), která mají pevnost v tahu mezi 3 a 4 GPa a modul pružnosti mezi 230 a 300 GPa.
 - vlákna s vysokým modulem (UHM fibers), která dosahují pevnosti v tahu od 2,5 do 4 GPa a mají modul pružnosti nad 400 GPa.
 - středně modulová vlákna (IM fibers) s pevností v tahu mezi 2,5 a 4 GPa a modulem pružnosti kolem 500 GPa.
 - extrémně vysoko modulová vlákna, která dosahují pevnosti v tahu od 2,5 do 4 GPa a mají modul pružnosti až 500 GPa.

[17, 18, 19]

1.4.3.2 Skleněná výztuž

Skleněná výztuž kompozitních materiálů je nejčastěji zastoupena ve formě skelných vláken. Běžná skelná vlákna jsou založena na oxidu křemičitém (SiO_2) a obsahují řadu dalších oxidů, jako je vápník, bor, sodík, hliník a železo. V tabulce číslo 1 níže, můžeme vidět přibližné složení některých běžně používaných skelných vláken v hmotnostních procentech. Setkáváme se zde s označením skelného vlákna písmenem E, což znamená elektrické, jelikož sklo je dobrý elektrický izolátor a má také dobrou pevnost a modul pružnosti. Písmeno C značí skelné vlákno s odolností proti chemické korozi. Skelné vlákno značené písmenem S, disponuje vysokým obsahem křemíku, který dělá toto sklo odolnějším vůči vyšším teplotám, než dokáže vydržet ostatní skla. Nejčastější používané jsou skelné vlákna typu E díky jejich univerzálnosti. [16]

Tabulka 1 Přibližné složení E, C, S skelných vláken v hmotnostních procentech [16]

Složení	E skelné vlákno	C skelné vlákno	S skelné vlákno
SiO ₂	55,2	65	65
Al ₂ O ₃	8	4	25
CaO	18,7	14	-
MgO	4,6	3	10
Na ₂ O	0,3	8,5	0,3
K ₂ O	0,2	-	-
B ₂ O ₃	7,3	5	-

V tabulce číslo 2 můžeme vidět srovnání aramidových, uhlíkových a skelných vláken co se týče jejich obecných vlastností. Porovnání je zde interpretováno pomocí písmen A, B, C, kdy A stojí za výborné, B za průměrné a C za špatné hodnocení dané vlastnosti.

Tabulka 2 Porovnání vlastností aramidových, uhlíkových a skelných vláken [16]

Vlastnost	Aramid	Uhlík	Sklo
Vysoká pevnost v tahu	B	A	B
Vysoký modul pružnosti v tahu	C	A	C
Vysoká pevnost v tlaku	C	A	B
Vysoký modul pružnosti v tlaku	B	A	C
Vysoká ohybová pevnost	C	A	B
Vysoký ohybový modul	B	A	C
Vysoká rázová pevnost	A	C	B
Vysoká smyková pevnost mezi vrstvami	B	A	A
Vysoká smyková pevnost v rovině	A	B	A
Nízká hustota	A	B	C
Vysoká odolnost proti únavě	B	A	C
Vysoká odolnost vůči ohni	A	C	B
Vysoká tepelná izolace	A	C	B
Vysoká elektrická izolace	B	C	A
Nízká tepelná roztažnost	A	A	A
Nízké náklady	C	C	A

1.4.4 Rozdělení dle materiálu matrice

Jak už bylo výše zmíněno, materiál matrice hraje důležitou roli na výslednou podobu kompozitního materiálu, jelikož spojuje výztuž v jeden celek a tím tvoří výslednou podobu a tvar. Velmi často se jako materiál matrice používá keramika, kov a polymery. A právě polymerní matrice jsou ty nejhojněji používané.

Nejběžněji používané typy matic:

- Polymerní matrice (PMC)
- Kovové matrice (MMC)
- Uhlíkové matrice (CeMC)
- Keramické matrice (CaMC)

[2]

1.4.4.1 Polymerní matrice (PMC)

Polymerní matrice se dělí na dvě skupiny a to polymerní matrice termoplastické a reaktoplastické (nebo také termosetové). Jak termoplasty tak reaktoplasty se velmi liší svými vlastnostmi, a proto je důležité mezi nimi rozlišovat a zaručit tak výběr pro vhodné použití dle zadaných požadavků. Reaktoplastické matrice se připravují pomocí smíchání pryskyřice a tvrdidla. Nejrozšířenější je laminární struktura, která se vyrábí za pomoci spojování polymeru a tenkých vrstev vláken do požadované tloušťky materiálu. Velkou výhodou polymerních matic je jejich snadná manipulace a jednoduché výrobní metody. [6, 11]

Reaktoplastické matrice

Reaktoplasty neboli termosety jsou polymery, které se přeměňují z kapalného stavu na pevný za pomoci nevratné chemické reakci. Před zahájením této reakce jsou materiály ve formě malých, volně spojených molekul zvaných monomery. Přidání specifických chemikálií nebo vystavení určitým podmínkám, jako je teplota, dojde k zahájení reakce, během které se monomery spojují do mnohem delších řetězců a vytvářejí pevnou síť. Tento proces se nazývá vytvrzování, a je trvalý. Po ztuhnutí již reaktoplast nemůže být roztaven pro další zpracování. Vystavení vyšším teplotám po vytvrzení vede k rozkladu materiálu, nikoli k jeho tavení. Proces zesíťování snižuje riziko přetavení materiálu při působení tepla a zajišťuje strukturální pevnost. Reaktoplasty také nabízejí snadnější smáčení výztužových vláken, snadnější tvarování do finální podoby, dlouhou životnost s nižšími cenovými nároky na použité suroviny. Tedy celkově jednodušší zpracování než matrice termoplastické a z toho důvodu jsou nejčastěji používané.

Zde je obecné shrnutí výhod a nevýhod reaktoplastických matic:

- Skvělý estetický vzhled
- Dobrá rozměrová stabilita
- Levnější náklady na suroviny
- Zlepšení mechanických vlastností (chemická a tepelná odolnost, strukturální pevnost)
- Nelze je recyklovat
- Složitější povrchová úprava

[6, 11]

Termoplastické matrice

Termoplasty jsou druh plastů, které je možné opakovaně tavit a opět nechat ztuhnout při změnách teploty. Tento typ materiálu se stává tvarovatelným, roztaveným nebo kapalným, pokud projde zahřátím nad teplotu tání, což umožňuje jeho zpracování do různých forem. Po odstranění zdroje tepla a ochlazení materiál znovu ztuhne do pevného stavu. I když tento proces může být opakován mnohokrát, kvalita materiálu s každým cyklem mírně klesá, což omezuje celkový počet opakování efektivního tavení a tuhnutí. Termoplasty jsou oblíbené pro výrobu díky jejich adaptabilitě a možnosti dosažení dlouhých molekulárních řetězců, což jim umožňuje mít vysokou molekulovou hmotnost. Nabízejí tvrdší vlastnosti, snadnější recyklaci a opravitelnost, lepší chemickou odolnost a nevyžadují chlazení tak, jako většina nevytvrzených reaktoplastů.

Zde je obecný přehled výhod a nevýhod termoplastických matic:

- Vysoká pevnost, odolnost vůči smrštění a snadné ohýbání
- Recyklovatelné
- Tavitelné, tvarovatelné
- Vysoká rázová a chemická odolnost
- Rozmanitost povrchu a estetických úprav
- Ekologičtější výroba
- Vyšší cena surovin než u reaktoplastů
- Dlouhá doba skladování předem nasycených tkanin [6, 12]

1.4.4.2 Uhlíkové matrice (CeMC)

Uhlíková matrice je často využívána ve spojení s uhlíkovými výztužemi, přičemž se klade důraz na nízkou hmotnost a odolnost vůči vysokým teplotám. Tento typ materiálu se používá například při tepelné izolaci raketoplánů a u komponentů jako jsou disky a třecí prvky brzd. Uhlíková matrice může být křehká. Další významnou nevýhodou je vysoká cena výroby a náchylnost k oxidaci na vzduchu. Modul pružnosti se pohybuje v rozmezí 15 až 25 GPa.

Uhlíková matrice zvyšuje pevnost, tvrdost a odolnost materiálu vůči teplotním změnám. Díky tomu, že má uhlík velmi nízkou hustotu, patří uhlíková výztuž s uhlíkovou maticí mezi významné kompozity, kde jsou zlepšeny vlastnosti měrné pevnosti a měrné tepelné vodivosti. Kromě toho má tento typ materiálu koeficient tepelné roztažnosti blížící se nule. [14]

1.4.5 Rozdělení dle disperzní fáze

Kompozity lze klasifikovat na základě typu disperzní fáze. Každý kompozit musí obsahovat alespoň jednu spojitou fázi (matrici), která jej pojí dohromady a další nespojitě tedy disperzní fáze, které jsou rozprostřeny v materiálu. Na základě podoby disperzní fáze rozlišujeme tři druhy kompozitů:

- Kompozity prvního druhu - kompozity s pevnou disperzní fází jsou nejběžnějším typem, a jsou ceněny pro svou vysokou pevnost, tuhost a odolnost vůči mechanickému poškození. Typickými příklady jsou partikulární, vláknové či laminované kompozity.
- Kompozity druhého druhu - kompozity s kapalnou disperzní fází mohou nabízet unikátní vlastnosti, jako je vysoká deformabilita a adaptabilita. Jedná se méně časté případy, které nacházejí uplatnění například ve farmaceutickém průmyslu nebo mohou být použity pro spékané kovy pro ložiska vodních strojů, například čerpadel pracujících pod vodou. Můžeme se s nimi setkat také v přírodě jako systém trubic s mízou.
- Kompozity třetího druhu - mají plynou disperzní fází a zahrnují pěny a aerogely. Tyto materiály mají obvykle velmi nízkou hustotu, vynikající tepelné izolační vlastnosti a mohou být použity v široké škále aplikací od tepelné izolace po absorbenty nárazů. [4]

2 ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Zpracování kompozitních materiálů zahrnuje širokou škálu technik a postupů, které umožňují vytvářet složité a vysoce výkonné konstrukce. Výběr správné metody zpracování závisí na požadovaných vlastnostech výrobku, jeho geometrii, množství a dalších faktorech. Každá z těchto metod má své výhody a omezení, a může být vhodná pro různé aplikace a prostředí. Mezi časté metody zpracování kompozitů patří:

- Ruční laminace
- Vakuová infuze
- Kompresní formování prepregů
- Vytvrzování v autoklávu
- Nanášení sprejem
- Pultruzní výroba
- Navíjení
- Transferové lisování (RTM)

[2, 7, 21]

2.1 Ruční laminace

Ruční laminace kompozitu je tradiční metoda vytváření kompozitních materiálů, kde je zesilující vlákno nebo tkanina impregnována pryskyřicí a ručně aplikována do formy. Tento proces začíná umístěním suché zpevňující tkaniny do formy, následované aplikací pryskyřice, často pomocí štětce nebo stěrky. Pryskyřice je následně rovnoměrně rozprostřena po celé ploše tkaniny pomocí konsolidačního válce, aby se odstranily vzduchové bubliny a zajistila rovnoměrná saturace vláken pryskyřicí. V některých případech může být aplikována volitelná gelová vrstva na povrch formy před vložením tkaniny pro zlepšení povrchového vzhledu a ochrany.

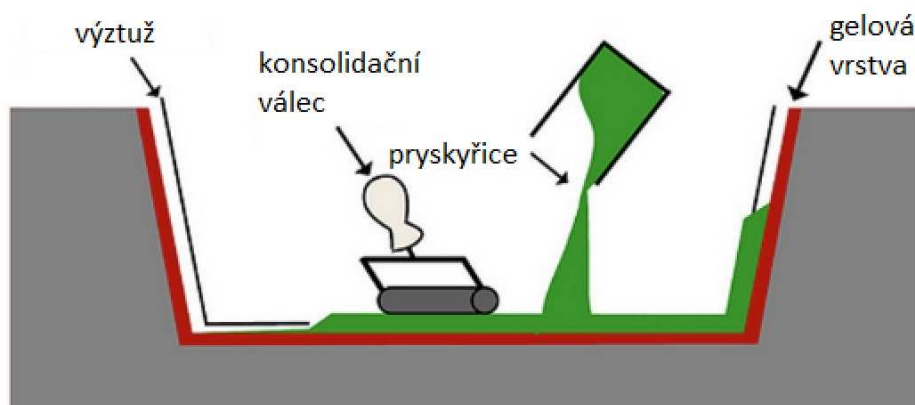
Mezi výhody ruční laminace patří:

- Nízké počáteční náklady, kdy není potřeba žádné drahé vybavení a metoda je tedy ideální pro malé série nebo jednotlivé projekty.
- Flexibilita, jež umožňuje výrobu složitých tvarů a výrobků různých velikostí.
- Jednoduchost výroby, jelikož není těžké naučení pracovních postupů nanášení, což umožňuje rychlé zavedení do výroby.
- Přizpůsobivost, umožňuje použití širokého spektra tkanin a pryskyřic pro různé aplikace.

Nevýhody ruční laminace:

- Pracovně náročné - vyžaduje mnoho manuální práce, což může vést k neefektivitě při vyšším počtu výrobků.
- Nižší pevnost - může vzniknout výrobek s nižší pevností ve srovnání s kompozity vytvořenými pomocí pokročilejších technik.
- Dlouhý čas vytvrzování - vzhledem k otevřenému procesu může být doba tvrdnutí delší.
- Omezení z hlediska kvality - ruční práce může vést k většímu množství vad, jako jsou bubliny nebo nerovnoměrné nasycení tkaniny.

Ruční laminace je často využívána ve výrobě námořních a rekreačních plavidel, ve stavebnictví pro výrobu panelů a komponentů a v automobilovém průmyslu pro výrobu nárazníků a podobných dílů. [2, 23]



Obrázek 6 Schéma metody ručního laminování [23]

2.2 Vakuová infuze

Vakuová infuze je pokročilá metoda výroby kompozitních materiálů, která spočívá v nasáknutí zesilujícího vlákna nebo tkaniny pryskyřicí v podtlaku. Jak je znázorněno na obrázku číslo 7, suché vlákno je umístěno do formy a překryto vakuovým pytle, který zabezpečí těsný uzávěr. Po vytvoření vakua, které odstraní vzduch z formy a zajistí rovnoměrné rozložení tlaku, je pryskyřice pomocí vakuového tlaku vtažena do formy, kde zcela prosákne vlákno. Na jednom konci je vakuový přívod a na druhém konci vývod, což umožňuje pryskyřici proudit přes vlákno a zcela jej nasáknout. Vstup pryskyřice je řízen a monitorován, aby se zajistilo, že materiál je kompletně nasycený bez přebytečné pryskyřice, která by mohla způsobit deformace nebo zvýšenou hmotnost finálního produktu.

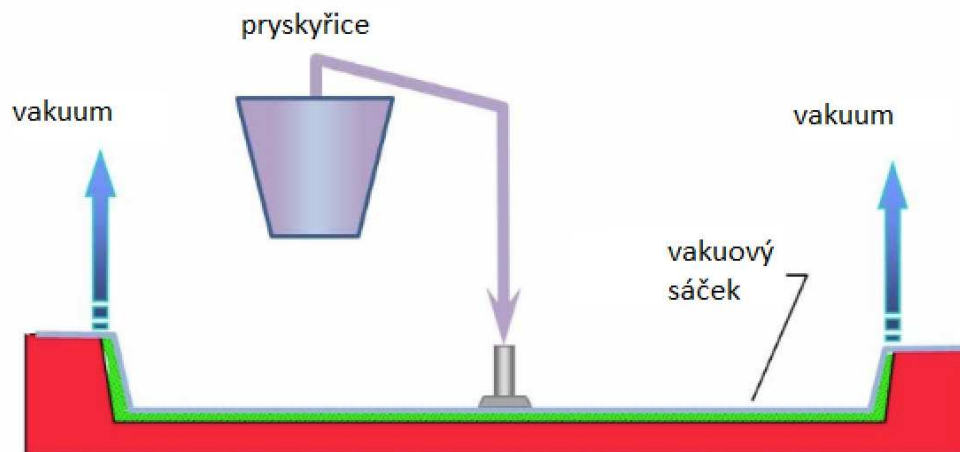
Výhody vakuové infuze:

- Efektivní využití materiálu - redukuje se množství odpadu pryskyřice a vlákna.
- Vysoká kvalita výrobku - díky rovnoměrné distribuci pryskyřice a minimálnímu obsah vzduchu ve výrobku.
- Lepší mechanické vlastnosti – za pomoci kontrolovaného procesu jsou výsledné kompozity často pevnější a mají lepší strukturální vlastnosti.
- Menší expozice pracovníků chemikáliím - vzhledem k uzavřenému systému jsou pracovníci méně vystaveni vlivu par z pryskyřice.

Nevýhody vakuové infuze:

- Vyšší počáteční náklady – metoda vyžaduje speciální vybavení a materiály pro vakuování.
- Složitější proces - nastavení systému a správné provedení procesu vyžaduje speciální znalosti a zkušenosti.
- Delší příprava - příprava formy a vakuového systému může být časově náročnější.

Vakuová infuze je často používána v leteckém průmyslu, výrobě lodí a ve vysokovýkonných aplikacích, kde jsou požadovány lehké a vysoce pevné materiály s vynikajícími povrchovými vlastnostmi. [2, 24]



Obrázek 7 Schéma metody vakuové infuze [24]

2.3 Kompresní formování prepregů

Kompresní formování prepregů, zkráceně PCM (prepreg compression molding), je pokročilá výrobní technologie, která se významně uplatňuje při zpracování uhlíkových vláken posílených plastem CFRP (carbon fibre reinforced plastic). Tato metoda je obzvláště ceněna pro svou schopnost vytvářet vysoce pevné a tuhé kompozitní materiály.

Základem procesu PCM je použití předimpregnovaných materiálů, tzv. prepregů. Prepregy jsou materiály, které byly již předem nasyceny pryskyřicí, což zajišťuje rovnoměrné rozložení pryskyřice a vláken. Tento přístup přináší výhody v podobě přesné kontroly poměru vláken a pryskyřice a zajišťuje konzistentní kvalitu finálních produktů.

Proces PCM zahrnuje několik klíčových kroků. Začíná přípravou laminátu z prepregů, které jsou následně vrstveny do požadovaného tvaru. Poté se laminát předehřívá, aby se zlepšila jeho formovatelnost. Po této předehřívací fázi následuje formování materiálu v chladném stavu, kde se laminát umísťuje do formy a vytváří požadovaný tvar.

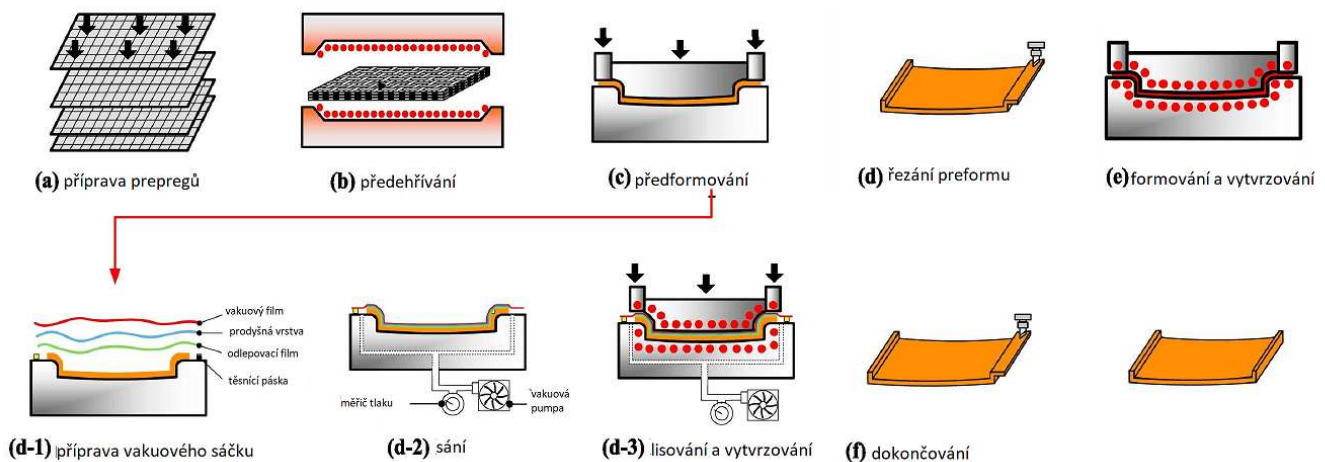
Dalším krokem je vlastní proces vytvrzování, kde se využívá vyhřívaných forem. Tyto formy zajišťují rovnoměrný přenos tepla, který je nezbytný pro správné vytvrzování pryskyřice, čímž dochází ke konečnému spojení uhlíkových vláken a matrice. Po vytvrzení se produkt odstraňuje z formy a podléhá dalším finálním úpravám, jako je řezání nebo obrábění, aby se dosáhlo požadovaných rozměrů a tvarů.

Jednou z hlavních výhod PCM je vysoká úroveň automatizace, což umožňuje masovou výrobu s konzistentní kvalitou. Kromě toho, díky kontrolám v každém kroku procesu, PCM

poskytuje vynikající reprodukovatelnost, což je klíčové pro aplikace vyžadující vysokou míru přesnosti a spolehlivosti.

PCM se však také potýká s některými výzvami, jako je například vznik dutin nebo nevyplněných míst během formování, což může negativně ovlivnit mechanické vlastnosti hotového produktu. Inovace, jako je použití vakuově asistovaných technik, byly vyvinuty k řešení těchto problémů a dále zlepšují kvalitu a výkon výsledných kompozitních materiálů. [27]

Prepreg Compression Molding (PCM) - kompresní formování prepregů



Obrázek 8 Schéma kompresního formování prepregů [27]

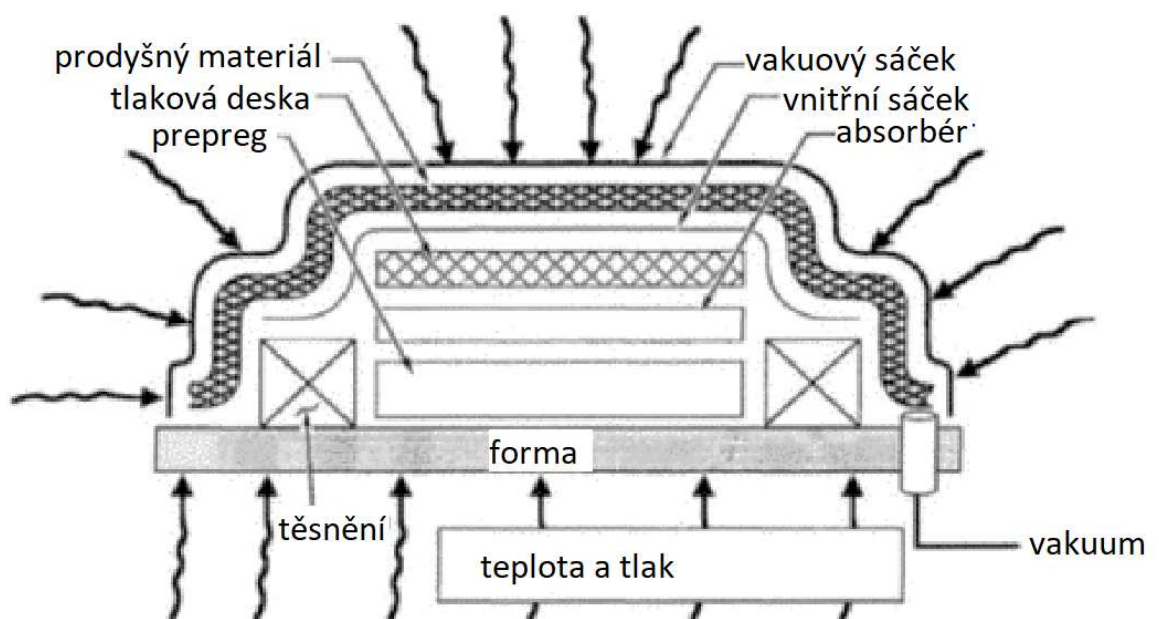
2.4 Vytvrzování v autoklávu

Metoda vytvrzování v autoklávu je pokročilá technologie, která využívá tlak a teplo k vytvrzování kompozitních materiálů. Během procesu se předimpregnovaná tkanina vrství na formu, pokrývá se tlakovou deskou a uzavírá do vakuového sáčku s absorbérem a dýchacím materiálem. Po vytvoření vakua se celý soubor umístí do zařízení zvaného autokláv, kde pod vysokým tlakem a teplotou dochází k vytvrzení. Po vytvrzení se kompozit ochladí a vyjme z formy, čímž vznikne finální produkt s vysokou pevností a dalšími specifickými vlastnostmi.

Tato metoda má několik výhod, jako je schopnost vytvrzovat více součástí najednou a vytvářet vysoce kvalitní a odolné výrobky. Avšak její použití má také některé nevýhody, včetně vysokých pořizovacích nákladů a náročnosti procesu, který vyžaduje speciální zařízení a dovednosti. Navíc je velikost výrobků omezena rozměry autoklávu, což může být omezením pro výrobu velkých součástí. Tyto nevýhody jsou kompenzovány výjimečnými

vlastnostmi vytvořených materiálů, zejména v leteckém průmyslu, kde je tato metoda běžně využívána pro výrobu kompozitních dílů s vysokými požadavky na pevnost a odolnost.

Výroba kompozitu v autoklávu i s popisy jednotlivých částí je zobrazena na obrázku níže. Proces výroby kompozitu pak probíhá následovně. Předimpregnovaná tkanina je položena na formu. Tato tkanina je již napuštěna pryskyřicí a připravena k vytvrzení. Forma dává budoucímu výrobku požadovaný tvar. Musí být odolná proti vysokému tlaku a teplotám, které působí během vytvrzování. Tlaková deska je umístěna nad předimpregnovanou tkaninu, aby zajistila rovnoměrné rozložení tlaku a tím hladký povrch výrobku. Vakuový sáček obaluje předimpregnovanou tkaninu a tlakovou desku a umožňuje vytvoření vakua, které je zásadní pro vytvrzování materiálu. Vnitřní sáček může být použit pro vytvoření sekundárního kontrolovaného prostředí okolo materiálu. Absorbér slouží k odstranění přebytečné pryskyřice a plynů vznikajících během vytvrzovacího procesu. Prodyšný materiál zajišťuje odvod vzduchu a přebytečného tepla, což umožňuje rovnoměrné rozložení tepla a tlaku. Těsnění brání úniku pryskyřice mimo prostor určený pro vytvrzení. Vytvořením vakua uvnitř vakuového sáčku se zajistí, že předimpregnovaná tkanina bude pevně přiléhat k formě a tlakové desce. Teplota a tlak autoklávu jsou nezbytné pro vytvrzení pryskyřice v předimpregnované tkanině. Autokláv poskytuje přesné řízení těchto podmínek po určitou dobu, což je klíčové pro získání materiálu s požadovanými vlastnostmi. [2, 21]



Obrázek 9 Metoda výroby kompozitu vytvrzováním v autoklávu [21]

2.5 Nanášení sprejem

Stříkací metoda výroby kompozitů je proces, kde se pomocí stříkací pistole aplikuje směs krátkých vláken a polymerního roztoku na povrch otevřené formy. Forma je předem ošetřena anti adhezivem, aby se zabránilo přilnutí kompozitu. Vlákná jsou přiváděna do pistole, kde jsou stříhána na krátké kousky a smíchána s polymerní směsí (matricí), která je pak stříkána na formu do požadované tloušťky vrstvy. Tento proces je často prováděn při pokojové teplotě, kde po aplikaci směs tuhne a finální produkt je možno vyjmout z formy.

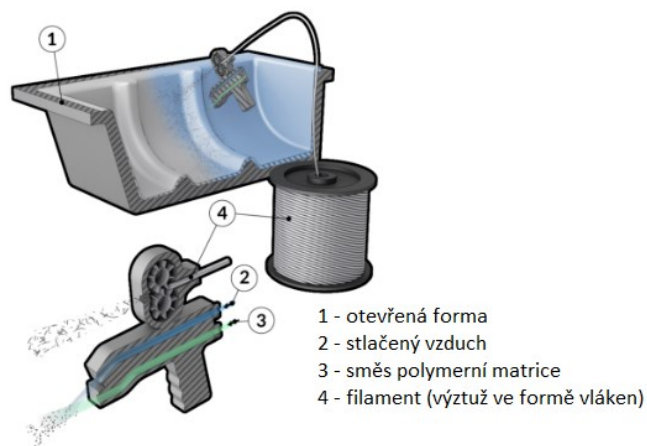
Výhody stříkací metody:

- Rychlá výroba - rychlejší než ruční metody laminace, což je výhodné pro sériovou výrobu.
- Flexibilita tvarů - možnost vytvářet složité tvary bez nutnosti komplexních forem.
- Jednoduchost - metoda nevyžaduje vysoce kvalifikovanou pracovní sílu.
- Materiálová efektivita - snížený odpad materiálu díky přesné aplikaci.

Nevýhody stříkací metody:

- Nižší mechanické vlastnosti - krátká vlákna poskytují nižší pevnost v tahu než dlouhá vlákna nebo tkaniny.
- Omezení v kvalitě povrchu - povrch kompozitu může vyžadovat dodatečné zpracování.
- Zdravotní rizika - stříkání může generovat aerosoly a chemické páry, které mohou být škodlivé pro lidský organismus.

Tato metoda se často používá ve výrobě lodí, rekreačních vozidel, bazénů a koupelnových prvků, kde není požadována extrémní mechanická pevnost, ale je žádoucí rychlá a flexibilní výroba. Také se využívá pro výrobu velkých průmyslových součástí, jako jsou větrné turbíny nebo autokaroserie. [25]



Obrázek 10 Schéma výroby kompozitu metodou vstřikování pryskyřice [25]

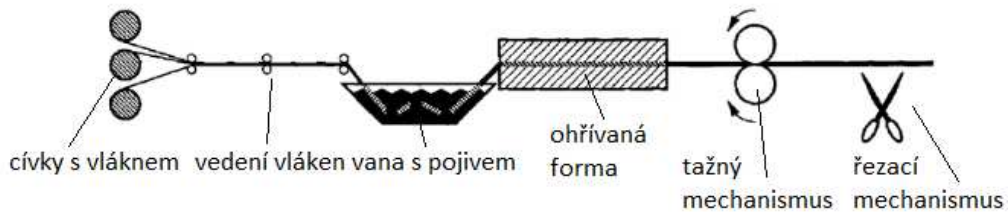
2.6 Pultruzní výroba

Pultruze je výrobní proces sloužící k tvorbě kompozitních materiálů, kdy se nepřetržitě táhnou zesilující vlákna skrze pojivo ve formě pryskyřice a následně se formují a vytvrzují do pevného profilu s konstantním průřezem. Tento proces vyniká schopností vytvářet dlouhé kompozitní prvky s vysokou pevností a specifickými vlastnostmi, které jsou dány použitými vlákny a pryskyřicí.

Jednotlivé kroky procesu jsou následovné. Začíná se zásobováním vláken posilňujících finální produkt. Tyto vlákna jsou vytahována z cívek umístěných na držáku a směřují dále do procesu. V dalším kroku jsou tato vlákna přivedena do koupele s pryskyřicí, kde jsou zcela nasycena tímto pojivem. Vlákna tak získají požadované vlastnosti a jsou připravena na další formování. Nasycená vlákna jsou pak dále tažena skrze vyhřívanou formu, která je klíčovou částí pultruzního zařízení, neboť určuje finální tvar výrobku a zahajuje proces vytvrzování pryskyřice. Jak vlákna procházejí formou, teplo spustí chemickou reakci, při které pryskyřice postupně tuhne. Forma je navržena tak, aby bylo možné v ní pryskyřici vytvrdit do požadovaného tvaru, a nadbytečná pryskyřice je odstraněna. Když kompozitní materiál opouští formu, je už v podstatě pevný. Po výstupu z formy je kompozit veden do chladicí zóny, kde se teplota stabilizuje a materiál dostává své finální vlastnosti. V poslední fázi je kompozitní materiál nepřetržitě tažen za pomoci tažného mechanismu, který udržuje celý proces v pohybu, až k řezacímu zařízení, kde je uříznut na předem stanovenou délku.

Tento proces umožňuje výrobu dlouhých dílů s konstantním průřezem a vynikajícími mechanickými vlastnostmi, díky nepřetržité orientaci vláken a homogennímu nasycení pryskyřicí. Výhodou je automatizace, vysoká produkční rychlost a minimální odpad.

Nevýhodou může být vysoká počáteční investice do zařízení a omezení na tvary s konstantním průřezem. [2, 21]



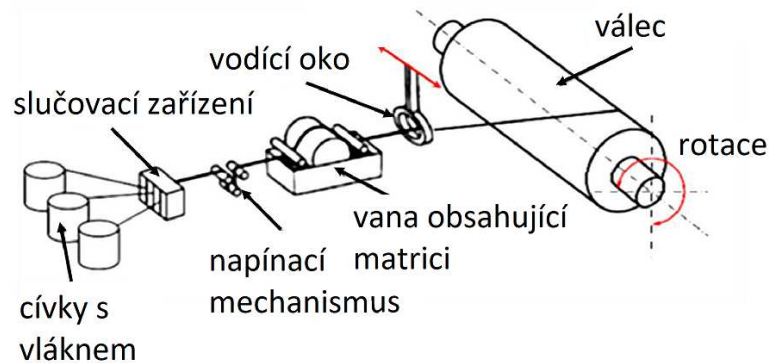
Obrázek 11 Schéma pultruzní linky pro reaktoplasty [21]

2.7 Navíjení

Metoda navíjení je klíčovou technologií s nízkými náklady pro výrobu kompozitních materiálů s využitím nepřetržitých výztuží. Tento automatizovaný proces umožňuje rychlé a přesné pokládání kontinuálních výztuží ve formě vláken k vytvoření uzavřených kompozitních struktur. Během navíjení filamentu jsou nepřetržitá vlákna, která byla impregnována termosetovou nebo termoplastickou polymerovou matricí, ovinuta kolem rotačního vřetene (nejčastěji válce). Pomocí rychlosti navíjecí hlavy a uhlové rychlosti vřetene je možné určit orientaci vláken. Takto je možné vytvořit struktury s různými tvary podle konfigurace a řízení navíjecí hlavy.

Kompozitní struktury vytvořené touto metodou nalézají uplatnění zejména v oblasti uchovávání tekutin pod tlakem, jako jsou nádrže na palivo nebo zásobníky kyslíku. V některých případech jsou tyto struktury vystaveny vnějšímu tlaku, jako například potápěčské zvony nebo ponorky. Metoda navíjení filamentu byla zvolena jako výrobní proces pro tyto aplikace, neboť umožňuje vytváření silných struktur s požadovaným tvarem za nízkých nákladů. Navíc díky možnosti spojení laminátu bez potřeby speciálního zařízení jako je autokláv, má tento proces významné výhody oproti jiným metodám výroby kompozitů struktur libovolných velikostí. Nižší náklady na výrobu ve srovnání s jinými metodami, a zachování vysokých objemových frakcí vláken jsou hlavními výhodami. Naopak nevýhody zahrnují omezení geometrie a orientace vrstev kompozitu a potřebu přesného řízení podmínek navíjení pro dosažení požadovaného objemu vláken.

Celkově je metoda navíjení filamentu efektivním způsobem výroby kompozitních materiálů s využitím nepřetržitých vláken a nachází široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích. [2, 22]



Obrázek 12 Výroba kompozitu pomocí metody navíjení [22]

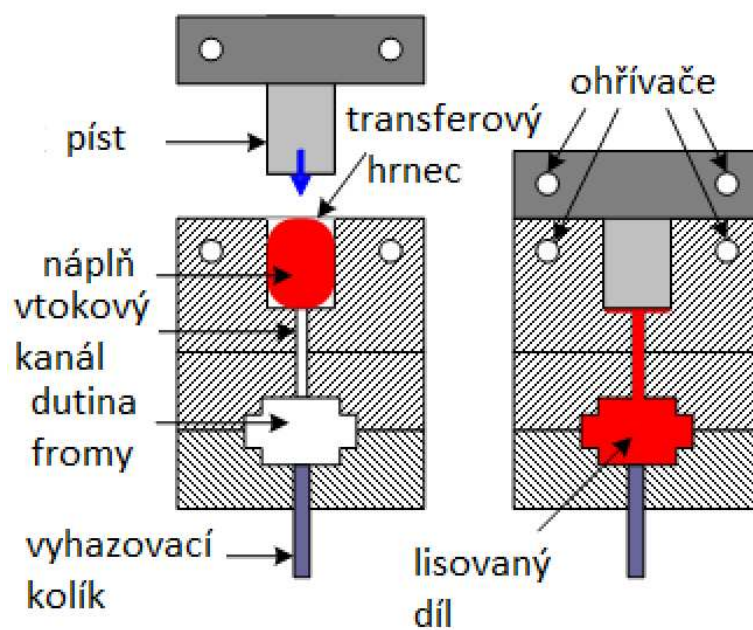
2.8 Transferové lisování (RTM)

Transferové lisování, známé také jako Resin Transfer Molding (RTM), je metoda uzavřeného formování, která umožňuje výrobu kompozitních materiálů. Předem odvážené množství polymerní směsi se nejprve předehřeje v samostatné komoře, zvané transferový hrnec, a poté se za tepla a tlaku vtlačí do předehřáté formy, kde obaluje a prostupuje zesilující vlákna. Díky teplu a tlaku dojde k vytvrzení polymerní matrice. RTM je vhodné pro termosetové pryskyřice, ale může se použít i pro některé termoplasty.

Výhody RTM zahrnují schopnost vyrábět kompozitní díly s vysokou úrovní detailů a skvělou povrchovou úpravou na obou stranách. Dále umožňuje použití různorodých druhů vláken a směsí pro různé aplikační požadavky a nabízí větší rozměrovou přesnost než jiné metody, jako je ruční laminace. RTM může efektivně vyrábět složité tvary a je vhodné pro střední až vysoké objemy výroby.

Nevýhody RTM zahrnují vyšší náklady na zařízení a formy a delší cykly výroby. Proces také vyžaduje pečlivě kontrolovaný výrobní cyklus a může být méně efektivní pro výrobu jednoduchých tvarů nebo pro velmi krátké výrobní časy.

RTM se často používá ve výrobě automobilových dílů, leteckých a kosmických komponent, v oblasti sportovního vybavení a ve stavebnictví, kde je potřeba pevných a odolných kompozitů. [26]



Obrázek 13 Schéma metody zpracování kompozitů RTM [26]

3 SJEZDOVÉ LYŽE

3.1 Sjezdové lyžování

Lyžování je zimní sport, který kombinuje adrenalin sjezdu po nakloněných sněhových svazích s technickou náročností ovládnutí lyží a koordinací těla. V dnešní době již představuje kulturní fenomén a významnou složku turistického průmyslu a ačkoli se původně vyvinulo z praktických důvodů pohybu v zasněženém terénu v severských zemích, dnes je to především sport ovlivněný vývojem vybavení a techniky, který slaví úspěchy v olympijských disciplínách a nabízí rozmanité možnosti od rekreačního lyžování, přes vysoko výkonnostní závodění, až po extrémní formy, jako je freeride či ski alpinismus. V moderní době mají lyžaři na výběr z rozmanitých lyžařských disciplín, a k nim také náležitých typů lyží, od hlubokého sněhu, upravených sjezdovek, až po uměle vytvořené tratě, snowparks a urampy. Tyto možnosti otevírají dveře k nekonečným lyžařským dobrodružstvím a posouváním hranic tohoto sportu, čímž lyžování zůstává jedním z nejrozšířenějších a technicky nejproměnlivějších zimních sportů na světě. A právě posouvání těchto hranic a neustávající progres v lyžařských disciplínách vede ke stále se zvyšujícím nárokům právě na výrobu samotných lyží. [28, 29]

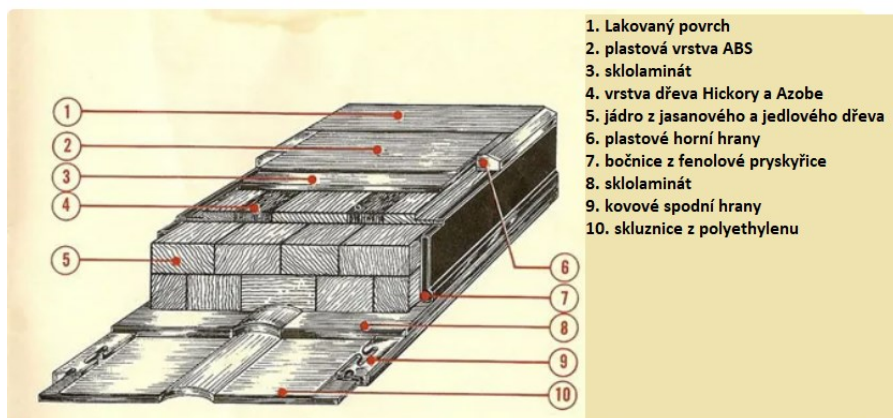
3.2 Historie výroby sjezdových lyží

Lyžování, původně využívané jako způsob dopravy v zasněžených regionech, se postupem času transformovalo v oblíbený zimní sport. Jeho historie sahá do doby před více než 8 000 lety před naším letopočtem, kdy byly v severní Číně nalezeny první dřevěné lyže. Následně, v oblastech dnešního Ruska a Skandinávie, bylo lyžování dokumentováno prostřednictvím skalních maleb a ryteb.

Na počátku 20. století byla představena koncepce prohnutých lyží pod vázáním (technologie zvaná camber), které umožňovaly lepší rozložení váhy lyžaře a výrazně zlepšily jejich ovladatelnost. V 30. letech pak byly představeny první úspěšné laminované lyže s použitím voděodolného lepidla.

Zima 1950 znamenala začátek nové éry ve vývoji lyží. Nové lyže, se středovým jádrem z překližky umístěným mezi dvěma hliníkovými deskami a s plastovými boky a kovovými hranami z jednoho kusu, výrazně usnadnily ovládnutí a zatáčení. V 60. letech přišel vynález lyžařských brzd, které snížily riziko úrazů spojených s používáním řemínků. V roce 1964 se

lyže Rossignol Strato staly nejprodávanějšími lyžemi na světě, díky jejich konstrukci z lepeného laminátu a sklolaminátových kompozitů. [28, 29]



Obrázek 14 Schématický průřez prvních lyží ze sklolaminátových kompozitů na světě Rossignol Strato [28]

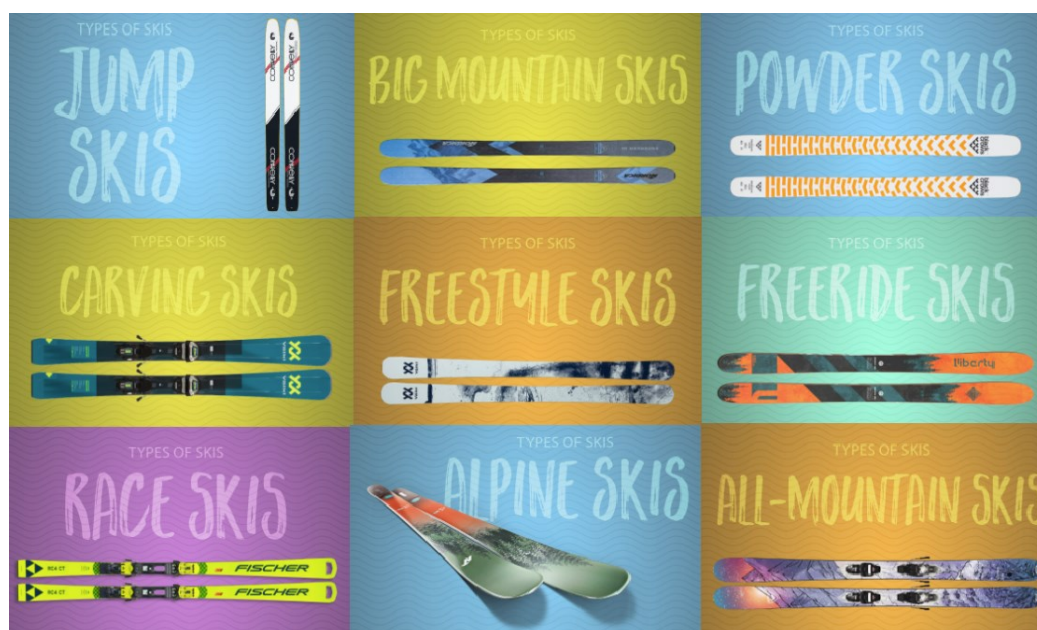
V 70. a 80. letech investoval průmysl masivně do vývoje nových materiálů a technologií tlumení vibrací. V polovině 90. let se objevily první parabolické lyže, které usnadnily carving, a zároveň byly vyvinuty první lyže se zvednutými špičkami i patami (twin-tip) pro freestyle lyžování a snowparky.

V novém tisíciletí se lyže dále vyvíjely, přičemž vznikaly modely různých tvarů a šířek pro specifické lyžařské disciplíny jako downhill, carving, freeride a freestyle. Nejnovějším významným rozvojem je takzvaný rocker, inovace z USA, která spočívá ve zvednutí a prodloužení špičky lyže, což usnadňuje ovládání a jízdu v hlubokém sněhu, zatímco klasický "camber" zachovává dobrou přilnavost na upravených sjezdovkách.

Dnes, i když dřevěné jádro zůstává základem mnoha lyží, výzkum mezi výrobci lyží aktivně pokračuje s důrazem na nanomateriály a další kompozitní materiály, což odrazuje neustálou inovaci a snahu o dosažení lepšího spojení mezi lyžařem a sněhem. [28, 29]

3.3 Typy sjezdových lyží

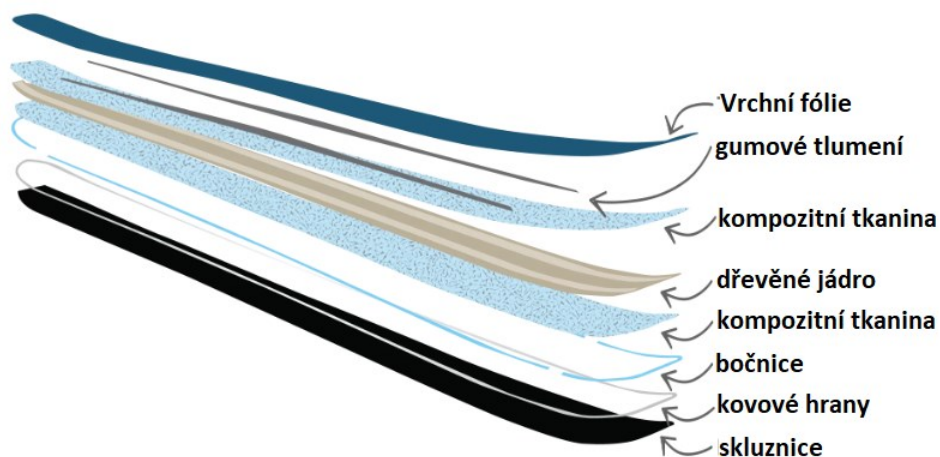
- **All-mountain lyže** pro všestranné a rekreační sjezdové lyžování na různých typech terénu. Vhodné pro většinu lyžařských stylů a lyžařských úrovní.
- **Big mountain lyže** pro pokročilé lyžování mimo upravené svahy. Vhodné lyže pro pokročilé a agresivní lyžaře.
- **Prašanové lyže (Powder lyže)** jsou široké a stabilní lyže, ideální pro lyžování v těžkém neupraveném terénu a hlubokém sněhu (prašanu).
- **Freestyle lyže** pro lyžování ve snowparku a urampě, a pro provádění triků.
- **Freeride lyže** jsou všestranné lyže do neupraveného terénu, kombinující Freestyle a big mountain lyže, vhodné pro pokročilé lyžaře.
- **Carving lyže** jsou poměrně rychlé a obratné lyže určené pro sjezdové lyžování na upravených svazích.
- **Závodní lyže (Racing lyže)** jsou velmi rychlé, tvrdé a poměrně dlouhé lyže určené pro závodní lyžaře a vysoké rychlosti.
- **Skialpové lyže** jsou velmi lehké lyže určené pro vystoupaní na vrchol pomocí chůze a následný sjezd neupraveným terénem.
- **Skokanské lyže** jsou velmi dlouhé a široké lyže určené pouze pro skoky ze skokanských můstků. [30, 31]



Obrázek 15 Vybrané typy sjezdových lyží [31]

3.4 Konstrukce sjezdových lyží

Výroba a konstrukce moderních sjezdových lyží je dnes již plně ovlivněna pokročilými technologiemi, kdy je každá vrstva lyže navržena a zpracována tak, aby zajistila ty nejlepší výkony na svahu. Proces začíná výběrem materiálů - dřevěné jádro z kvalitního dřeva dodává lyžím jejich základní charakteristiky, jako je pružnost a odolnost. Následně se aplikují strukturální vrstvy z kompozitních materiálů, které lyže zpevní a zároveň zachovají jejich flexibilitu. Gumové tlumení je klíčové pro absorbování nárazů a vibrací během jízdy. Při konstrukci je kladen důraz na pečlivé uspořádání a spojování vrstev tak, aby se dosáhlo požadovaného chování lyže při různých lyžařských stylech a podmínkách. Pro spojování se používají epoxidové pryskyřice. Sjezdové lyže jsou výsledkem promyšleného designu a každý aspekt, od hrany až po svrchní vrstvu, hraje důležitou roli, která ovlivní finální vlastnosti a použití lyže. [32]



Obrázek 16 Schématické složení sjezdové lyže [32]

- **Vrchní fólie** - Vrchní fólie, známá také jako topsheet, je důležitou součástí konstrukce lyží, která má nejen estetickou funkci, poskytující prostor pro grafiku a design, ale také chrání vnitřní vrstvy lyže, jako je jádro a kompozitní tkaniny, před vnějšími poškozeními a vlhkostí. Navíc pomáhá udržet celkovou integritu lyže a přispívá k její strukturální pevnosti. Vyrábí se obvykle z odolného materiálu, jako je plast typu nylon nebo speciálně upravené polyamidy, což jí dodává výbornou odolnost proti poškrábání, nárazům a povětrnostním vlivům.

- **Kompozitní tkaniny** - Zesílení jádra je klíčovou částí lyže. Různé materiály výrazně ovlivňují, jak se lyže chová na sněhu a volba daných materiálů je znakem toho, jakých vlastností lyže chceme jako výrobci dosáhnout. Existují tři běžné materiály využívané při zesílení jádra lyže:
 - Skleněné vlákno - Zdaleka nejrozšířenější kompozit. Tento relativně levný materiál je k dispozici v různých hmotnostech a tkaninách. Skleněné vlákno zajišťuje velmi "tlumenou" jízdu. Těžší hmotnost má tendenci absorbovat více vibrací při vysoké rychlosti a nerovném terénu, a nedochází k přenosu těchto kmitů do nohou. Použitím skleněného vlákna se nicméně snižuje životnost lyže. Skleněné vlákno s časem degraduje bez ohledu na použití, obvykle začne ztrácet svou pružnost po 5-10 sezónách pravidelného používání.
 - Kov - Použití kovového zesílení zajišťuje "nejtlumenější" jízdu. Díky pevnosti a trvanlivosti kovu to dodává lyži spoustu tuhosti jak v podélné, tak v torzní flexi. Použití kovu jako zesílení výrazně přidává na hmotnosti lyže, což v některých případech je výhodou a v některých naopak nevýhodou. Kvůli tomu je kov nevhodný pro touringové a skialpové lyže ale naopak se výborně hodí pro lyže závodní. Nejčastěji se jako kovová výztuha používá Titanal.
 - Uhlík - Toto je nejlehčí a nejsilnější používaný zesilovací materiál. Kromě toho uhlík netrpí přirozenou degradací. Proto má pružnost lyží mnohem delší životnost. Na druhou stranu uhlíku chybí tlumící účinky skleněného vlákna nebo kovu, takže se často kombinuje s jednou z těchto možností. [31, 32, 33]
- **Jádro** - Jádra lyží jsou konstruována jako lamináty. Tenké kousky dřeva/kompozitů slepené dohromady, aby vytvořily unikátní materiál disponující flexibilními charakteristikami. Některé lyže používají pouze jeden druh dřeva, a toto dřevo je frézováno na dané rozměry a tloušťky, aby bylo silnější v částech, které potřebují tuhost a pevnost. Jiné lyže jsou vrstveny s různými druhy dřeva a kompozitů, aby dosáhly stejných výsledků, kombinujících pevnost při redukci hmotnosti.

Typické materiály jádra:

- Dřevo - Většina lyží je vyrobena s jádrem z přírodních materiálů (dřevo nebo bambus). Přírodní materiály poskytují nejdelší flexibilní životnost, než začnou degradovat. Kromě toho jsou velmi pevné a odolné. Oblíbená dřeva používaná při konstrukci lyží jsou jasan, javor, topol a osika. Jasan a javor patří mezi

nejtuzší, nejtěžší a nejodolnější dostupné dřeva. Naopak, topol a osika jsou mnohem lehčí, flexibilnější a méně trvanlivé. Můžeme se také setkat s materiálem lyží zvaného Paulownia (dřevina pocházející z Číny). Ačkoli tato dřevina není tak častá pro výrobu jader, jedná se o velmi kvalitní materiál, který nabízí vysokou flexibilitu při zachování dobrých pevnostních vlastností.

- Kompozitní konstrukce včelí plástve - Některé lyže stále využívají kompozitní jádra, někdy ve struktuře včelích pláství, která má velmi žádoucí poměr tuhosti k hmotnosti. Šestiúhelníkový tvar umožňuje výrobcům minimalizovat množství použitých materiálů, čímž snižují hmotnost a neobětují žádnou pevnost. Některé lyže používají různé typy materiálu ISO-Core, který zahrnuje směs pěny a skleněného vlákna, opět nabízející vysoký poměr tuhosti k hmotnosti. Tyto kompozity nabízejí fantastickou flexibilitu a nižší cenu, ale mají tendenci degradovat trochu rychleji než jejich přírodní protějšky. [32, 36]
- **Bočnice** - Bočnice lyží jsou klíčové pro ochranu jádra lyže a přenos síly od lyžaře na sněh. Vyrábějí se obvykle z pevných materiálů, jako jsou plasty ABS nebo P-tex, a jsou umístěny mezi vrchní folií a skluznicí lyže. Bočnice chrání jádro lyže před poškozením z vnějšku a zároveň pomáhají rozložit tlak vyvíjený lyžařem rovnoměrně po celé délce lyže, což zlepšuje kontrolu a držení hrany na tvrdém sněhu.
- **Tlumení** - Tlumící pásy jsou navrženy k absorpci vibrací, tlumení nárazů a roztažnosti materiálu při jízdě na nerovném terénu. Tyto pásy jsou typicky umístěny mezi vrstvami lyže, často v blízkosti hran nebo v oblasti pod vázáním. Materiály používané pro tlumící pásy zahrnují různé typy pryže, které jsou schopny absorbovat energii způsobenou vibracemi, čímž zvyšují komfort lyžaře a zlepšují jízdni vlastnosti.
- **Hrany** - Hrany lyží jsou zásadní pro držení lyže na sněhu, zejména při jízdě na zmrzlém a tvrdém sněhu. Jsou vyrobeny z oceli a jsou pevně uchyceny podél boků lyže. Hrany umožňují lyžaři řezat do sněhu a ovládat lyže při zatáčení a carvingu. Správná údržba hran a jejich broušení je klíčové pro optimální výkon lyže.

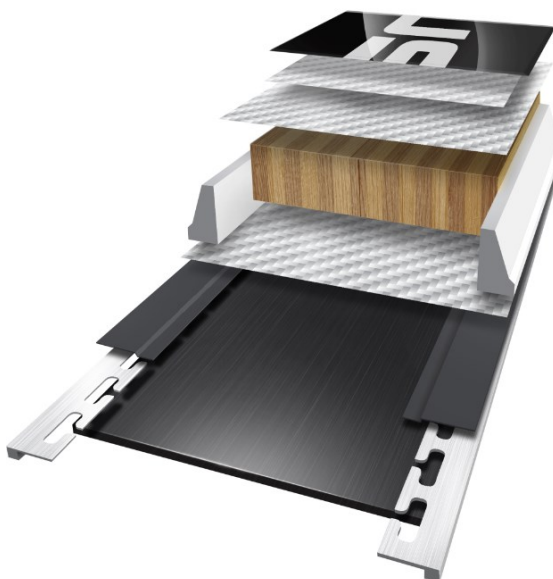
- **Skluznice** - Skluznice lyže má zásadní význam pro výkonnost a chování lyže na sněhu. Její primární úkoly jsou následující:
 - Zajištění klouzavosti a snížení tření: Skluznice umožňuje lyži snadno klouzat po sněhu. Díky své hladké a pevné struktuře minimalizuje tření mezi lyží a sněhem, což umožňuje lyžaři udržet rychlost a plynulost jízdy.
 - Ochrana jádra lyže: Skluznice působí jako ochranná vrstva, která chrání jádro lyže před poškozením.
 - Absorpce vosku: Vosk se aplikuje na skluznici, aby se zvýšila její klouzavost a odolnost proti vodě. Skluznice má v sobě póry, které jsou schopny absorbovat vosk, což umožňuje lepší a delší udržení klouzavosti a minimalizaci tření.

Materiál, ze kterého se skluznice nejčastěji vyrábí je ultra-vysokomolekulární polyetylen (UHMW-PE), známý pod obchodním názvem P-tex. UHMW-PE je vysoce odolný vůči opotřebení, má vynikající kluzné vlastnosti a dobře absorbuje vosk. Jsou dvě nejčastější metody, jakými lze skluznice vyrábět:

- **Sinterovaná skluznice:** Jedná se o speciálně upravený UHMW-PE, který je vyroben sinterováním – procesem, při kterém jsou částice materiálu stlačeny a zahřívány tak, aby se spojily, aniž by došlo k jejich úplnému roztavení. Sinterované skluznice jsou obecně odolnější a lépe absorbují vosk než extrudované skluznice.
- **Extrudovaná skluznice:** Tato skluznice je také vyrobena z UHMW-PE, ale procesem extruze, kdy je materiál roztaven a vytlačen do formy. Extrudované skluznice jsou levnější a snadněji se opravují, ale nejsou tak odolné jako sinterované a hůře absorbují vosk. [32, 33]

3.4.1 Sendvičová konstrukce lyže

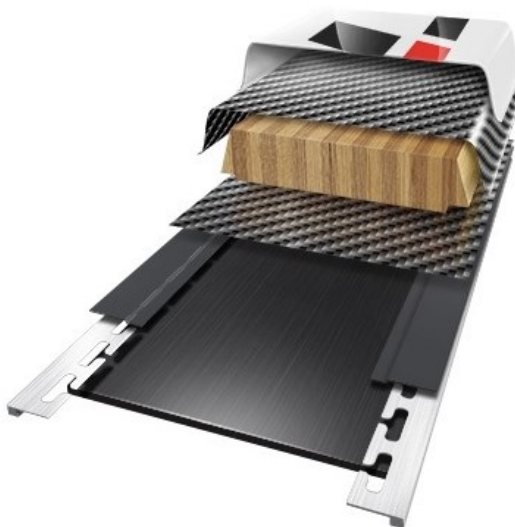
Sendvičová konstrukce je typ stavby, kde se bočnice z plastu ABS nebo P-tex umísťují na obě strany jádra. Tento typ konstrukce je trochu dražší, dělá lyži těžší a někdy může snížit torzní tuhost lyže. Nicméně se výrazně zvyšuje odolnost vůči nárazům a používání pro lyžování obecně, a stlačené hrany jsou snazší k opravě. Také tlak vyvinutý lyžařem při zatáčení a carvingu je na hranu lépe rozložen. Sendvičová konstrukce se častěji objevuje na dražších lyžích, určených do těžších podmínek, jako jsou neupravené terény nebo snowparky s plastovými a železnými překážkami. [33, 36]



Obrázek 17 Průřez sendvičovou konstrukcí lyže [33]

3.4.2 Capová konstrukce lyže

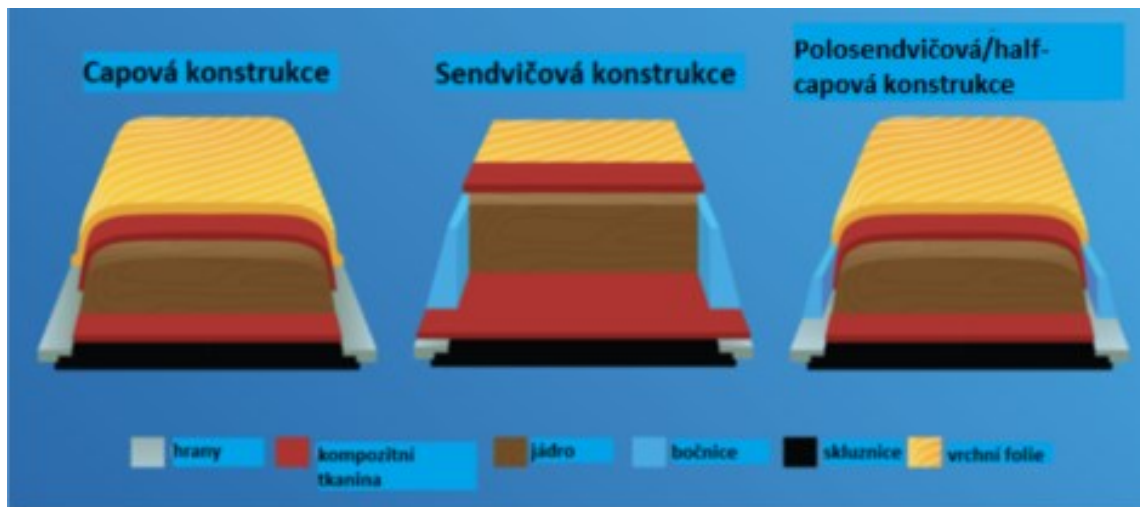
Capová konstrukce lyže znamená, že kompozitní tkanina spolu s vrchní folií obaluje vrchní část jádra a sahá až k hraně a plastové bočnice jsou zde tedy úplně vynechány. Ačkoliv tato metoda neposkytuje nejstabilnější hranu nebo lyži s největší odolností, jedná se o konstrukci, která zajišťuje poměrně dobrou torzní tuhost. Díky vynechání plastových hran dochází ke zmenšení nákladů na materiál, zjednodušení výroby lyže ale především citelnému snížení hmotnosti. Obecně se capová konstrukce používá pro lyže, které buďto nebudou vystavovány těžkému zacházení nebo u kterých hraje nízká váha zásadní roli, a do této kategorie spadají například touringové a skialpové lyže. [33, 36]



Obrázek 18 Průřez capovou konstrukcí lyže [33]

3.4.3 Half – capová konstrukce lyže

Konstrukce lyže, která kombinuje sendvičovou konstrukci ve střední části lyže s capovou konstrukcí na špičkách a patách. Tato hybridní metoda spojuje tuhost a přesný přenos síly sendvičové konstrukce ve středu lyže pro lepší řízení a držení hrany, zatímco capová konstrukce na koncích snižuje hmotnost a zvyšuje flexibilitu, což usnadňuje manévrování. Výsledkem je lyže, která je odolná, stabilní a přitom relativně lehká a vhodná pro různé terény a styly jízdy. [33, 36]



Obrázek 19 Porovnání capové, sendvičové a half-capové konstrukce lyže [36]

3.4.4 Technologie camber a rocker

Lyžování je dynamický sport, který vyžaduje od lyží schopnost přizpůsobit se rozmanitým sněhovým podmínkám a terénů, a také různým stylům ježdění daného lyžaře. Právě zde hrají klíčovou roli technologie camber a rocker. Historicky byly lyže vyráběny jako rovné desky, což je sice jednoduché, ale omezené v oblasti výkonnosti. Rovné lyže mají problémy se stabilitou, ovladatelností a přizpůsobením se rozmanitým sněhovým podmínkám, zejména v hlubokém sněhu a na nerovném terénu.

Technologie camber a rocker byly vyvinuty jako řešení těchto výzev. Camber, charakterizovaný prohnutím lyže s kontaktními body na obou koncích, poskytuje lepší rozložení váhy jezdce, což umožňuje přesnější a stabilnější zatáčení, zejména na tvrdém sněhu. Rocker, definuje pozvolné zvedání lyže na špičce nebo patě, což usnadňuje lyžování v měkkém a hlubokém sněhu a zlepšuje schopnost lyže adaptovat se na nerovný terén.

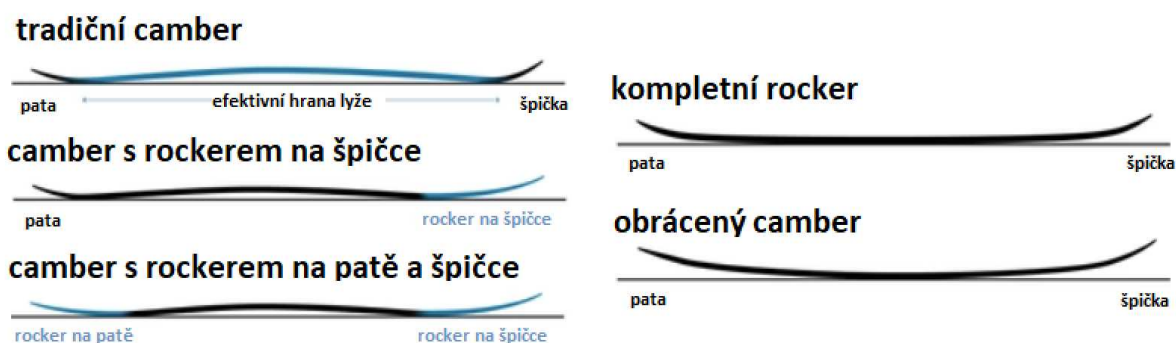
Rozvoj těchto technologií je odpovědí na potřebu všestrannějšího vybavení, které umožní zvládat široké spektrum lyžařských podmínek od ledových sjezdovek až po hluboký prašan.

Camber a rocker jsou zásadními inovacemi, které zásadně ovlivňují výkonnost a ovladatelnost lyží a bez kterých by lyžování nebylo takové, jaké ho dnes známe. [35]

Nyní se podíváme na podrobnější popis a srovnání obou těchto technologií:

- **Tradiční Camber** představuje klasický moderní design prohnutí lyže, kde je střední část vyklenutá vzhůru, vytvářející dva kontaktní body na koncích lyže. Když lyžař stojí na lyži, váha se rozloží po celé délce efektivní hrany, mezi těmito dvěma body.
 - **Výhody:** Zajišťuje výbornou stabilitu, přesnost a lepší kontakt hrany a sněhu, což je ideální pro rychlé zatáčení a lyžování na tvrdém povrchu. Umožňuje rychlý přechod do další zatáčky.
 - **Nevýhody:** V hlubokém a měkkém sněhu může být obtížnější udržet stabilitu a může vyžadovat pokročilejší lyžařské techniky.
- **Reverse Camber (obrácený camber)** je opak tradičního camberu, střed lyže se dotýká země, zatímco špička a pata směřují vzhůru. Tento tvar se podobá vodním lyžím a je zaměřen na koncentraci váhy v centrální části lyže.
 - **Výhody:** Vynikající ve velmi hlubokém sněhu díky skvělému nadnášení lyžaře na povrchu sněhu. Ideální pro lyžování v těch nejtěžších podmínkách v tom nejhlubším sněhu.
 - **Nevýhody:** Má minimální až žádnou efektivní hranu, což prakticky znemožňuje zatáčení a udržení stability při carvingu na upravených sjezdovkách.
- **Rocker** je kombinace camberu a reverse camberu. Rocker je charakterizován postupným vzestupem špičky nebo paty lyže od země, zatímco střed lyže je stále mírně vyklenutý.
 - **Typy Rockeru:**
 - **Symetrický Rocker:** Zvednutá špička a pata lyže.
 - **Tip Rocker:** Zvednutá špička lyže.
 - **Tail Rocker:** Zvednutá pata lyže
 - **Výhody Tip Rockeru:** Zlepšuje jízdu, stabilitu, manévrovatelnost a zatáčení v hlubokém a měkkém sněhu.

- **Nevýhody Tip Rockeru:** Způsobuje vibrace špičky při vyšších rychlostech a snižuje stabilitu na tvrdém povrchu.
- **Výhody Tail Rockeru:** Umožňuje snadné otáčení a výjezd ze zatáček, dobré pro lyžování v měkkých sněhových podmínkách.
- **Nevýhody Tail Rockeru:** Menší stabilita a výkon při jízdě po hraně v dlouhých zatáčkách. [35]



Obrázek 20 Porovnání technologií camber a rocker, a jejich variací [35]

3.4.5 Délka a šířka lyže

Výběr šířky a délky lyží závisí na především na typu terénu a schopnostech lyžaře. Obecně lze říci, že pro všestranné univerzální lyžování je doporučeno volit střední šířky lyží, pro rychlé a závodní lyžování na tvrdých upravených svazích jsou lepší užší lyže a pro jízdu v neupraveném terénu a hlubokém sněhu jsou ideální širší lyže. Co se týče délky lyže, je výběr už více subjektivní. Samozřejmě platí, že lyžaři s nižší postavou budou volit kratší lyže a lyžaři s vyšší postavou zvolí delší lyže. Nicméně pro méně zkušené lyžaře se doporučují kratší lyže, díky nižší váze a lepšímu manévrování a pro zkušenější lyžaře zase lyže delší, které mohou nabídnout větší stabilitu a podporu například při carvingu nebo vysokých rychlostech.

- **Úzké (70-85 mm na středu lyže):** Pro rychlé lyžování na upravených sjezdovkách a taktéž pro zmrzlý a tvrdý sníh. Nabízejí dobrou stabilitu a rychlost v zatáčkách. Nejsou vhodné pro lyžování v hlubokém sněhu.
- **Střední (85-104 mm na středu lyže):** Všestranné lyže pro pokročilé lyžaře, vhodné pro různé terény, od zmrzlého až po hlubší sníh.
- **Široké (104 mm a více na středu lyže):** speciální lyže pro lyžování v hlubokém sněhu, vhodné i pro středně pokročilé lyžaře. [34]

3.5 Mechanické zkoušky sjezdových lyží

Čerstvě vyrobené sjezdové lyže jsou podrobeny řadám zkoušek, aby se ověřila jejich kvalita výroby a výkonnost. Tento proces je klíčový pro zajištění konzistence a spolehlivosti produktu.

Příprava a Výběr Lyží

Před zahájením testů musí být lyže aklimatizovány na teplotu 23 °C s odchylkou ± 5 °C po dobu dvou hodin, aby byly výsledky jednotné. Pokud se jedná o modelovou řadu, která nabízí více rozměrů těchto lyží, pak se pro testování vybírají lyže různých velikostí, ideálně 150 cm, 180 cm nebo 200 cm, aby výsledky byly reprezentativní pro všechny velikosti. [37]

3.5.1 Měření pružnosti a torzní tuhosti dle ISO 5902

Zde je uplatněna norma standardu ISO 5902 poskytující přesný rámec pro měření elastických vlastností lyží, se zaměřením na odpor proti ohybu a torzi. Měření zahrnuje několik specifických postupů:

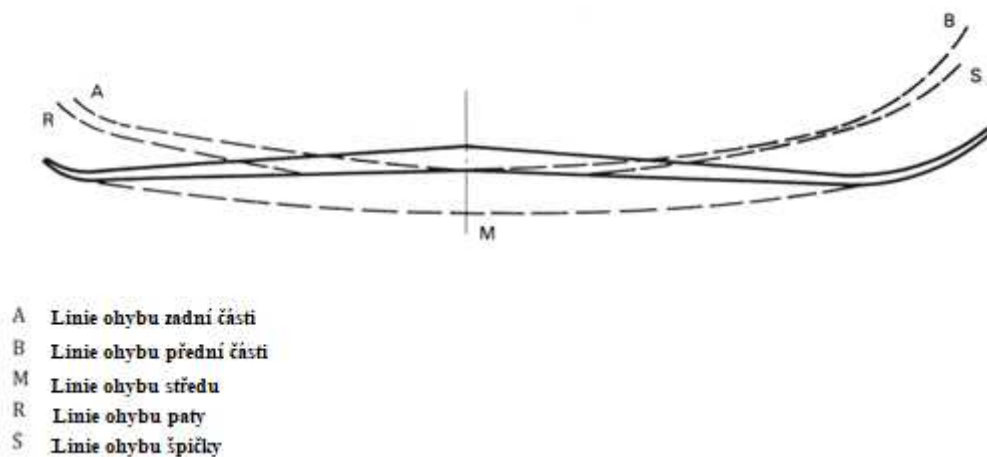
Měření tuhosti pružení

- Středová pružnost: Lyže jsou podporovány na dvou místech a zatěžovány v jejich středu. Měří se průhyb lyže pod aplikovaným zatížením, tedy v jejím středu.
- Pružnost špičky a paty a zadní a přední části: Lyže jsou zatěžovány v různých bodech, aby se zjistil odpor proti ohybu v těchto specifických oblastech.

$$c = \frac{F}{f} \quad (1)$$

Vztah pro výpočet konstanty tuhosti pružení c (1) představuje poměr aplikované síly F (Newtony) k prohnutí lyže f (milimetry). V případě testování konstanty tuhosti pružení v různých bodech lyže je značení následovné: c_A pro konstantu zadní části lyže, c_B pro konstantu přední části lyže, c_M pro konstantu středu lyže, c_R pro konstantu paty lyže, c_S pro konstantu špičky lyže. [37]

ISO 5902:2013(E)



Obrázek 21 Schéma zkoušky průhybu sjezdové lyže v různých místech [37]

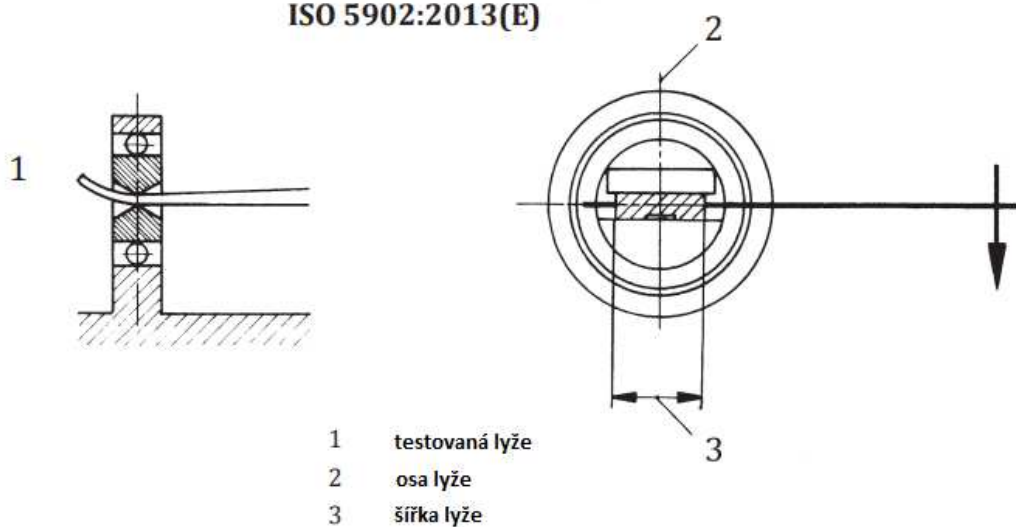
Měření torzní tuhosti

Torzní testy se provádějí za použití speciálního zařízení, které aplikuje torzní sílu na lyži a měří úhel zkroucení.

$$c_T = \frac{M}{\alpha} \quad (2)$$

Vztah pro výpočet konstanty torzní tuhosti c_T (2) představuje poměr aplikovaného momentu M (Newton metry) ke zkroucení lyže α (stupně). [37]

ISO 5902:2013(E)



Obrázek 22 Schéma zkoušky torzní tuhosti sjezdové lyže [37]

3.5.2 Měření indexu únavy pomocí cyklického ohybového namáhání dle normy ISO 6266

Dle předchozí zkoušky pružnosti středu lyže je určena hodnota průhybu ve středu lyže, do které se lyže bude cyklicky prohýbat. Jedná se o cyklickou zkoušku lyže o 20 000 zkušebních cyklech při frekvenci mezi 2 až 3 Hz, kdy výsledkem zkoušky je hodnota indexu únavy konstanty pružení středu a indexu únavy vzpruhu lyže, a vizuální kontrola jestli nedošlo k poškození lyže prohýbáním, tedy prasklinám nebo trvalé vychýlení z původní nezatížené pozice. [38]

Výpočet indexu únavy pružení středu lyže

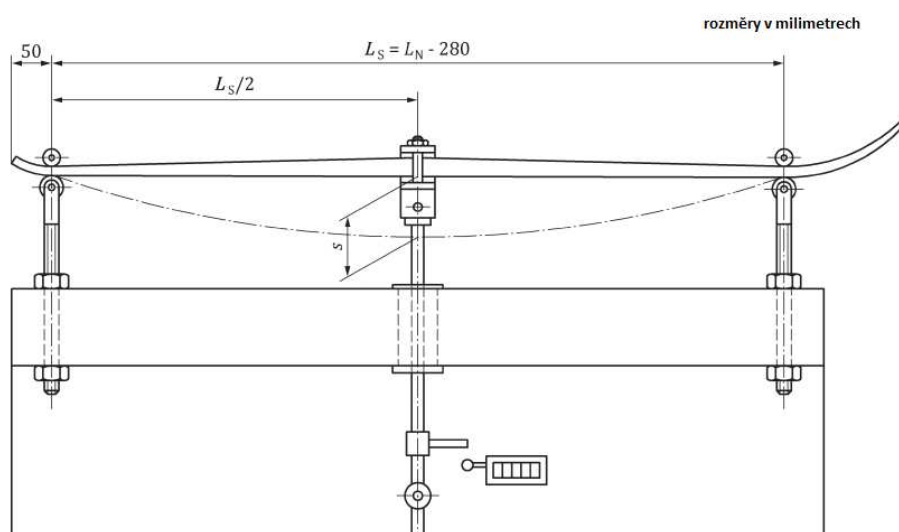
$$K_M = \left(c_M - \frac{c'_M}{c_M} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Vztah pro výpočet indexu únavy pružení středu lyže (3), kde c_M představuje počáteční konstantu pružení středu lyže a c'_M konečnou konstantu pružení středu lyže (jednotky v milimetrech).

Výpočet indexu únavy výšky vzpruhu lyže

$$K_h = \left(h_B - \frac{h'_B}{h_B} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Vtah pro výpočet indexu únavy výšky vzpruhu lyže (4), kde h_B představuje počáteční výšku vzpruhu středu lyže a h'_B konečnou výšku vzpruhu středu lyže (jednotky v milimetrech). [38]



Obrázek 23 Schématické měření únavy sjezdové lyže za pomoci cyklického ohybového namáhání dle normy ISO 6266 [38]

Analýza a interpretace výsledků

Výsledky měření jsou pečlivě analyzovány. Zahrnují hodnoty jako je konstanta tuhosti pružení, konstanta torzní tuhosti, index únavy výšky vzpruhu a index únavy konstanty středu, které poskytují informace o tuhosti a flexibilitě lyže v různých částech. Výsledky nepředstavují celkovou kvalitu lyže a její jízdní vlastnosti, ale poskytují důležitá data o jejích mechanických vlastnostech. [37, 38]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je nejprve v teoretické části popsat úvod do obecné problematiky kompozitních materiálů a poté se zaměřit na konkrétní využití kompozitních materiálů pro výrobu sjezdových lyží. Cílem praktické části je výroba sjezdových lyží se sendvičovou konstrukcí, počínaje návrhem designu, volbou použitých materiálů a technologického postupu.

Proběhne výroba celkem tří lyží vyrobených z totožných materiálů a se stejným složením sendvičové konstrukce, ovšem pomocí dvou různých výrobních metod. Dvě lyže budou vyrobeny pomocí jednodílné formy, vakuového pytle a vložení do autoklávu. Třetí lyže bude vyrobena komerční metodou výroby pomocí přesné ocelové dvojdílné formy a vložena do vyhřívaného lisu určeného pro výrobu lyží. Tyto lyže budou následně podrobeny standardizovaným zkouškám mechanických vlastností a proběhne vyhodnocení výsledků a porovnání kvality vyrobených lyží těmito metodami.

Shrnutí diplomové práce v jednotlivých bodech:

I. Teoretická část

- Úvod do problematiky kompozitních materiálů, jejich historie, definice, základní vlastnosti a hlavní rozdělení dle důležitých aspektů.
- Přehled vybraných technologií zpracování kompozitních materiálů, jejich popis, schéma procesu výroby, oblasti použití, výhody a nevýhody.
- Zaměření na teoretickou problematiku výroby sjezdových lyží, historie jejich výroby a jednotlivé typy, použití kompozitních materiálů pro sjezdové lyže, designové řešení a konstrukční stavba s popisy jednotlivých vrstev a částí lyží, přehled typů konstrukcí a přehled normalizovaných mechanických zkoušek pro kontrolu kvality vyrobených lyží.

II. Praktická část

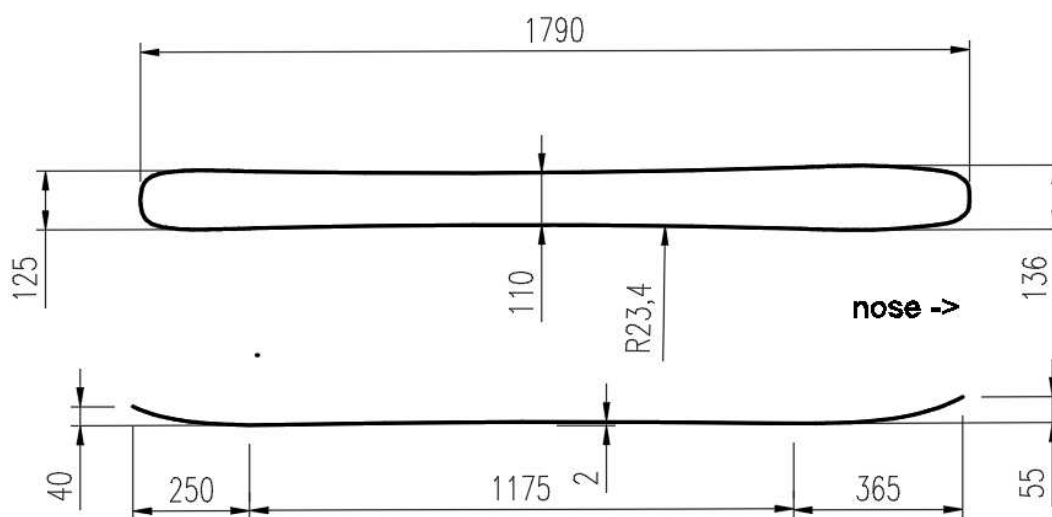
- Definice designu, typu a určení vyráběných lyží s nákresem hlavních rozměrů.
- Výroba kompozitních lyží se sendvičovou konstrukcí za pomoci zpracování v autoklávu.
 - Popis výroby formy pro lyže
 - Rozpis materiálů použitých k výrobě lyží

- Proces samotné výroby lyží, příprava materiálu a kladení jednotlivých vrstev
- Proces vložení lyží do vakuového pytle a vytvrzení v autoklávu
- Dokončovací operace
- Výroba kompozitních lyží se sendvičovou konstrukcí komerční metodou za pomoci lisování a vytvrzení ve vyhřívaném lisu.
- Zkoušení lyží na standardní nedestruktivní mechanické zkoušky pro ověření kvality výroby.
- Vyhodnocení výsledků a porovnání vyrobených lyží.
- Závěr.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ KOMPOZITNÍCH LYŽÍ

5.1 Charakteristika vyráběných lyží

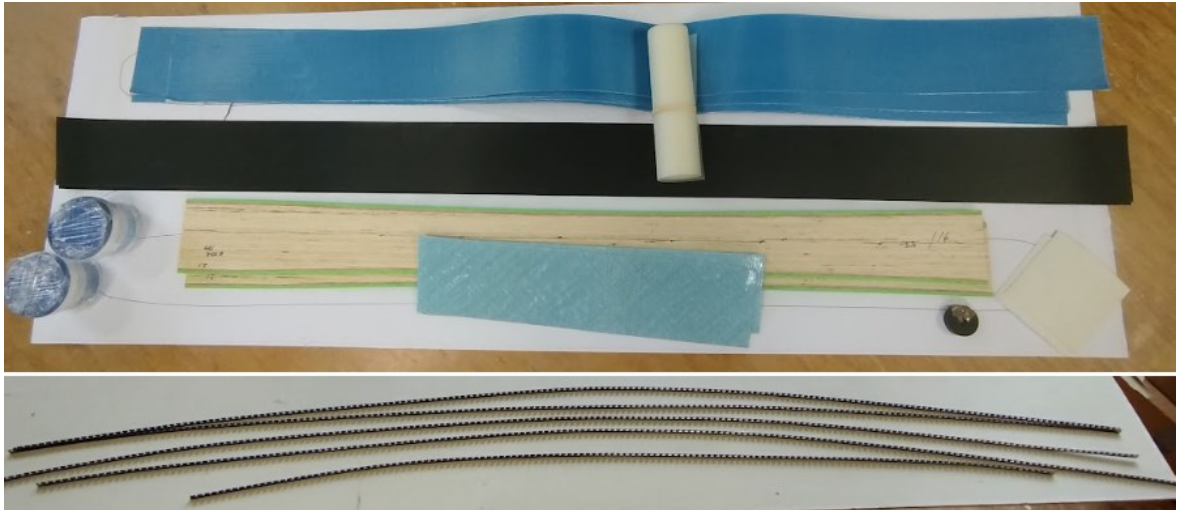
Jedná se o výrobu freeridových až backcountry lyží do neupraveného terénu a hlubokého sněhu. Zvolená délka lyží je 179 cm a šířka pod vázáním 110 mm. Lyže disponují téměř nulovým camberem 2 mm, dlouhým obloukem R 23,4 m a rockerem na patě o délce 250 mm a špičce o délce 365 mm. Kontaktní body jsou od sebe vzdáleny 1175 mm. Tato geometrie byla zvolena z důvodu určení použití lyží v hlubokém sněhu, kde jsou zapotřebí širší lyže s rockerem na obou stranách, zamezující boření jezdce do sněhu a usnadňující manévrování. Předpokládaný střed pro vrtání vázání je určen na – 2,5 cm od opravdového středu lyže, který se nachází v pozici 895 mm od obou konců.



Obrázek 24 Hlavní rozměry vyráběných lyží

5.2 Materiály použité na výrobu lyží

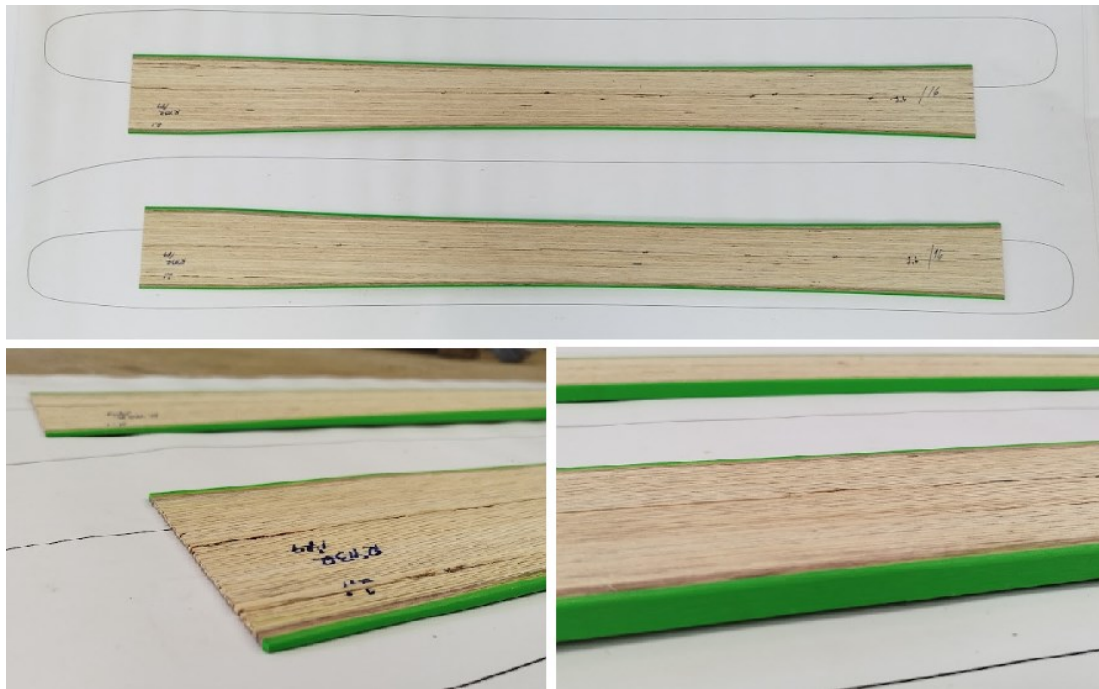
Materiálům pro výrobu lyží byla věnována velká pozornost, jelikož díky správné volbě vhodných materiálů a konstrukce získává lyže své charakteristické vlastnosti a chování při jízdě na sněhu. Jelikož se jedná o lyže do neupraveného terénu a těžkých podmínek, je vyžadována odolnost, houževnatost ale také tuhost z důvodu větší šířky lyže. Zvolené materiály jsou aktuálně používané a vyhovující materiály pro dnešní moderní provedení lyží a také pro tento konkrétní typ lyže. Materiály byly zakoupeny od firmy LUSTi.



Obrázek 25 Materiály pro výrobu kompozitních lyží

5.2.1 Jádro

Jelikož dřevěné jádro stále představuje jeden z nejvhodnějších materiálů pro stavbu sjezdových lyží díky svým pružným vlastnostem, nízké váze a životnosti, bylo zvoleno dřevěné jádro z jednosměrné smrkové překližky, tedy mnoho vrstev smrkového dřeva vrstvených a slepených na sebe v jednom směru. Z boků byly poté přilepeny bočnice z ABS plastu pro ochranu dřevěného jádra vůči nárazu, poškození a vlhkosti. Smrková překližka představuje optimální řešení pro jádro freeridové lyže, kdy nabízí odolnost, pevnost, dobrou cenu ale především nízkou váhu, která je pro freeridové lyže klíčová (udávaná váha vysušeného smrkového dřeva je $300 - 400 \text{ kg/m}^3$ a například u často používaného jasanového dřeva je to $620 - 670 \text{ kg/m}^3$). Takto poskládané jádro bylo poté frézováno na profil o délce 149 cm, který má tloušťku 2 mm na koncích a 14 mm ve středu lyže pod vázáním a odpovídá stanoveným rozměrům krojení lyže.



Obrázek 26 Dřevěné jádro z jednosměrné smrkové překližky a ABS hranami

5.2.2 Skluznice

Pro výrobu lyží byla použita černá sintrovaná závodní skluznice od výrobce ISOSPORT vyrobená z ultra vysokomolekulárního polyetylenu (UHMW-PE) s 20% příměsí uhlíku.



Obrázek 27 Sintrovaná skluznice použitá k výrobě lyží

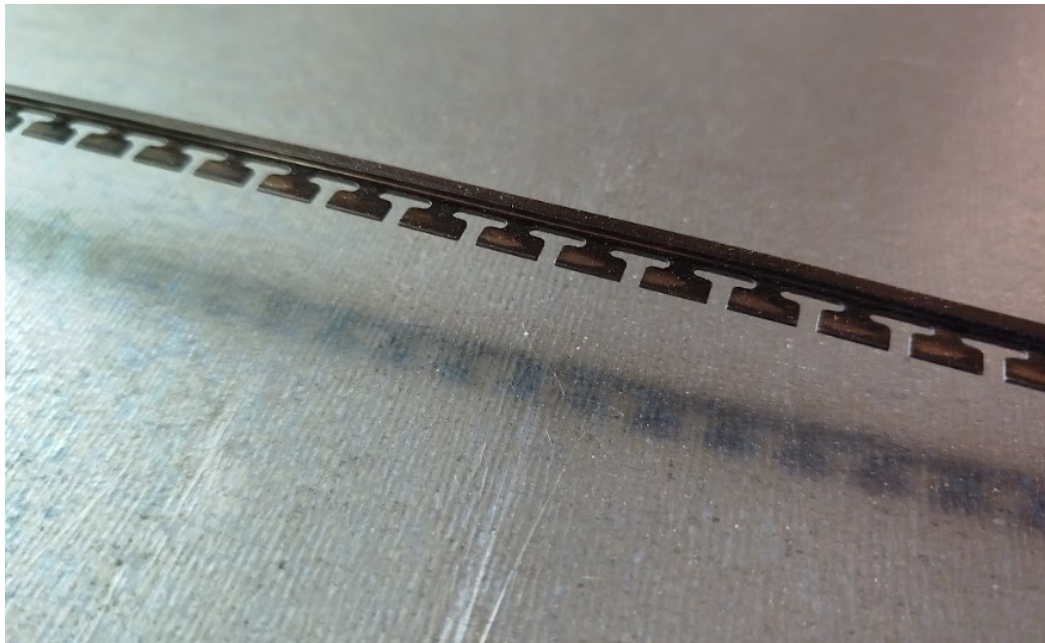
Tato skluznice se hodí pro většinu vyráběných typů a modelů lyží, díky své velké rychlosti na sněhu kvůli dobré absorpci vosku jejími póry (1,85 mg/cm²).

Tabulka 3 Vlastnosti materiálu skluznice

Kategorie	Vlastnosti	Jednotky	Norma	Hodnota
TERMICKÉ VLASTNOSTI	Teplota měknutí podle Vicata	°C	DIN ISO EN 306	133
MECHANICKÉ VLASTNOSTI	Tvrdość	Shore D	PA FE019	65
DALŠÍ VLASTNOSTI	Hustota	g/cm ³	DIN 53 479	0,985
	Absorbce vosku	mg/cm ²	PA FE008	1,85
	Obsah uhlíku	%	PA FE009	20

5.2.3 Hrany

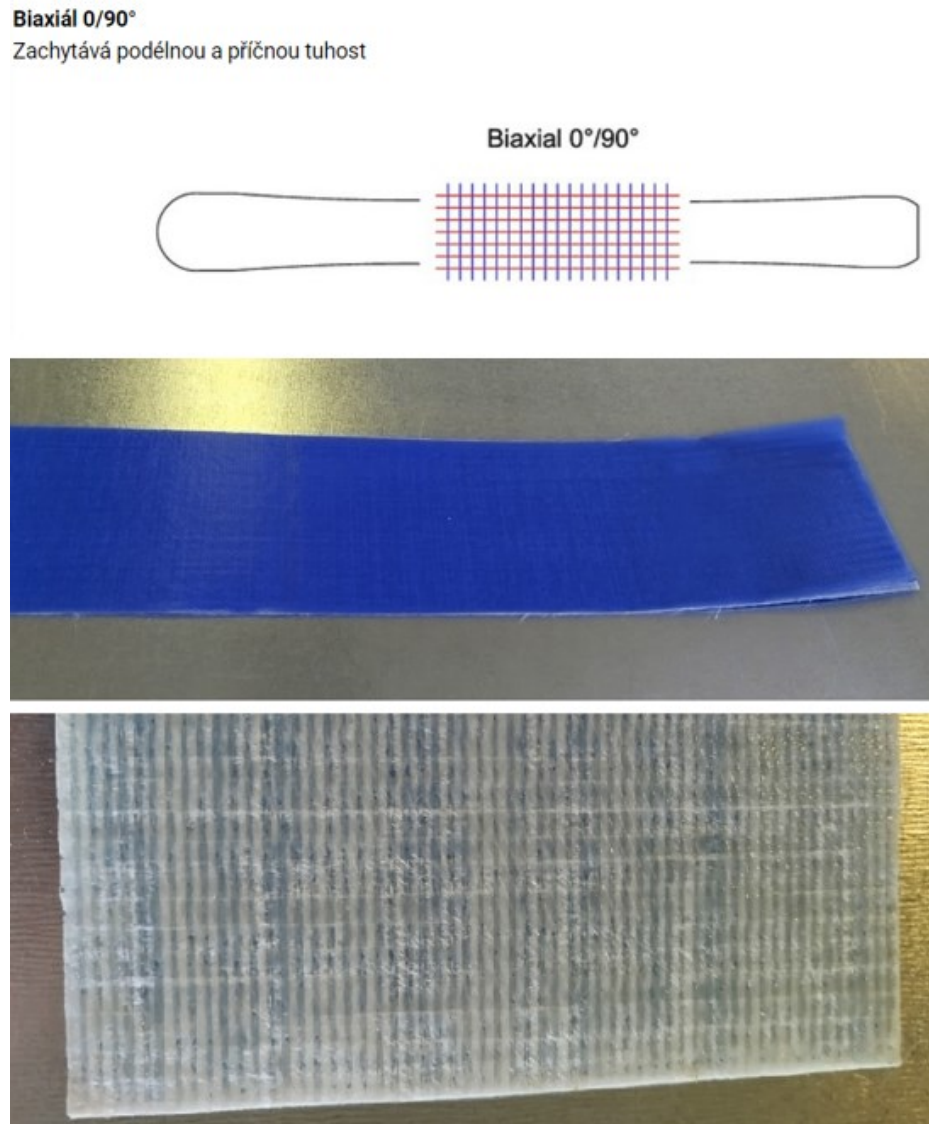
Byly použity standardní kvalitní ocelové hrany o tvrdosti 40 HRC.



Obrázek 28 Ocelové hrany použité pro výrobu lyží

5.2.4 Kompozitní tkaniny

Jako hlavní kompozitní tkanina byla použita biaxiální skelná tkanina ve formě prepregu s E skelnými vlákny ve směrech 0° a 90° . Hmotnost prepregu je 887 g/m^2 (hmotnost tkaniny 542 g/m^2 , hmotnost pryskyřice 345 g/m^2). Tento prepreg je položen v celé délce lyže, jednou pod a podruhé nad dřevěným jádrem a pro správné vytvrzení je zapotřebí dosáhnout teploty 120°C .



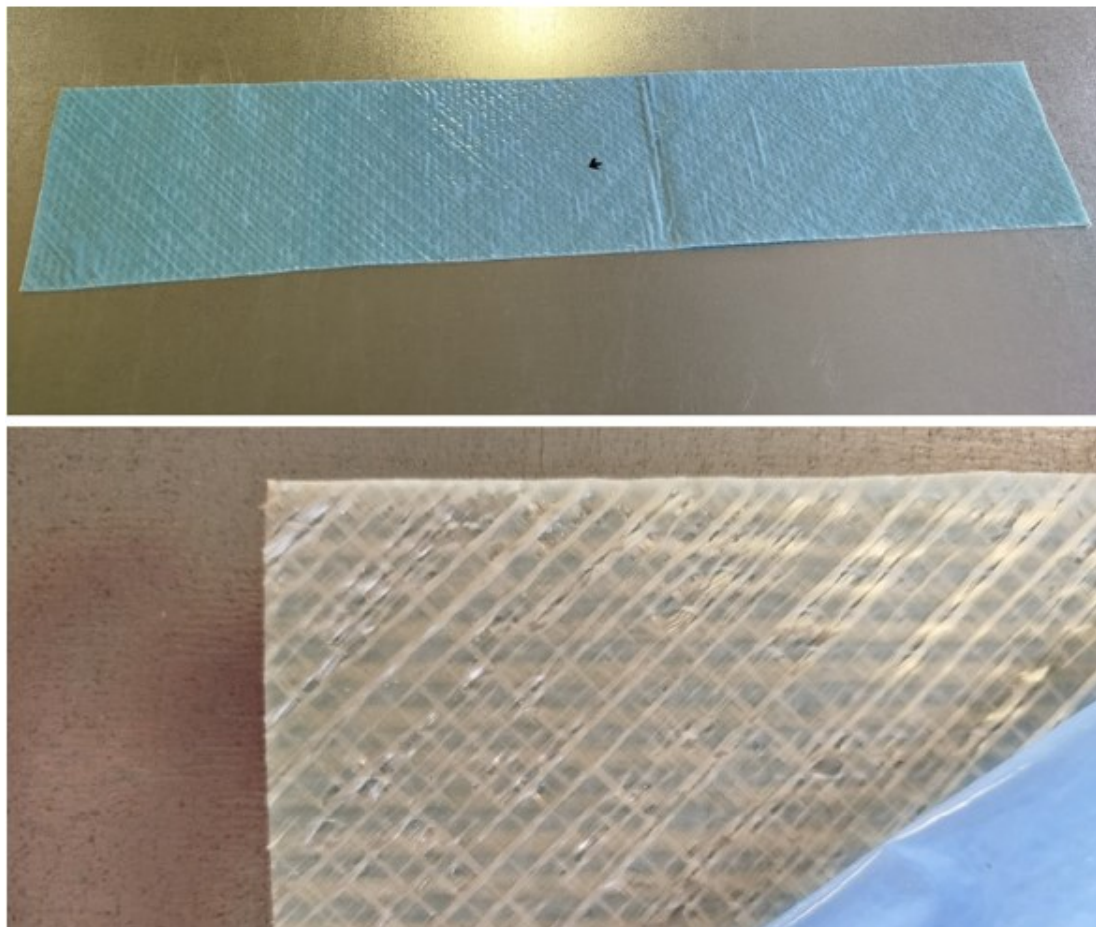
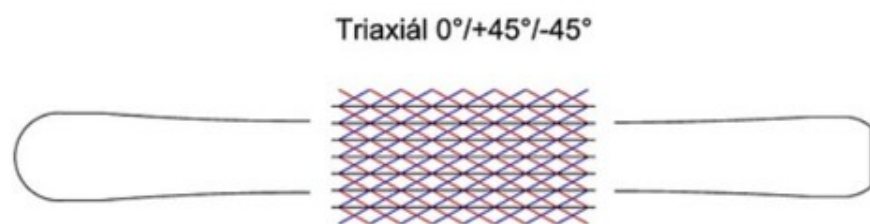
Obrázek 29 Biaxiální skelná tkanina použitá pro výrobu lyží

5.2.5 Výztuž

V oblasti pod vázáním byla umístěna triaxiální skelná tkanina ve formě prepregu s E skelnými vlákny ve směrech 0° , $+45^\circ$ a -45° . Hmotnost prepregu je 1503 g/m^2 (hmotnost tkaniny 933 g/m^2 , hmotnost pryskyřice 570 g/m^2). Tento prepreg je kladen v délce 60 cm na střed lyže a má za cíl zvýšit tuhost v oblasti pod vázáním, zajistit pevné uchycení šroubů a zamezit jejich vytrhnutí. Taktéž je nutné dosáhnout teploty 120°C pro správné vytvrzení.

Triaxiál $0^\circ/\pm 45^\circ$

Zachytává podélnou a torzní tuhost



Obrázek 30 Triaxiální skelná tkanina použitá jako výztuž pod vázáním

5.2.6 Vrchní fólie (Topsheet)

Jako vrchní vrstva lyže byla použita transparentní polyamidová fólie s ochrannou vrstvou, která chrání povrch fólie během výroby a je odstraněna na konci výrobního procesu lyže.



Obrázek 31 Transparentní horní fólie (topsheet) použitá pro výrobu lyží

5.2.7 Výztuže pro špičky a paty

Pro výztuže špiček a pat lyží byly použity 2 mm tlusté desky od firmy ISOSPORT vyrobené z ABS plastu s povrchovou strukturou dřeva, pro lepší přilnavost při lepení epoxidovou pryskyřicí. Tyto výztuhy nahrazují dřevěné jádro na koncích lyže z důvodu jejich větší odolnosti vůči nárazům a tím poskytují lyži delší životnost.



Obrázek 32 Výztuže pro špičky a paty z ABS plastu

Tabulka 4 Vybrané vlastnosti ABS plastu použitého pro špičky a paty lyží

Kategorie	Vlastnosti	Jednotky	Norma	Hodnota
TERMICKÉ VLASTNOSTI	Teplota měknutí podle Vicata	°C	DIN ISO EN 306	130
MECHANICKÉ VLASTNOSTI	Tvrdość	Shore D	PA FE019	67
DALŠÍ VLASTNOSTI	Hustota	g/cm ³	DIN 53 479	1,01
	Nárazová pevnost	-	PA FE018	10,8

5.2.8 Výplň

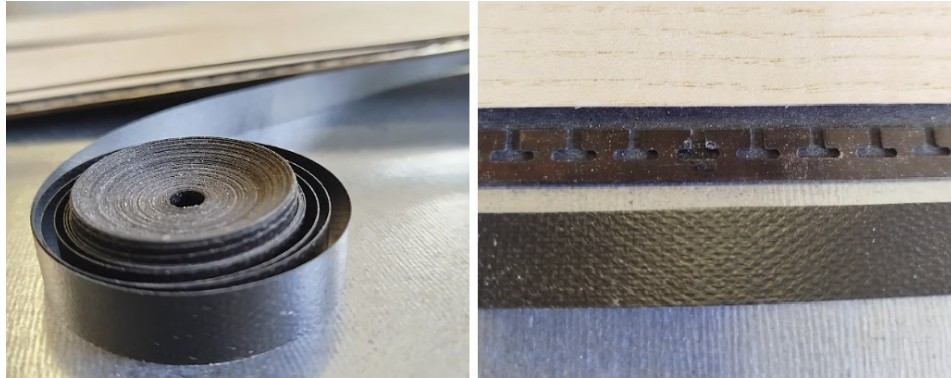
Jako výplň prostoru mezi skluznicí a dolní kompozitní tkaninou byla použita jasanová dýha o tloušťce 0,5 mm. Tato výplň musí být použita z důvodu eliminace přečnávajících zámků hran nad skluznici, také pro zajištění tužší konstrukce a rovné skluznice, která bude bez zvlněného povrchu nebo promáčklin a v neposlední řadě pro lepší přilnavost mezi skluznicí a dolní prepregovou vrstvou.



Obrázek 33 Jasanová dýha použitá jako výplň

5.2.9 Gumové tlumící pásky

Tlumící pásky vyrobené z pryže o šířce 10 mm a tloušťce 0,5 mm jsou položeny po celé délce lyže tak, aby zakrývaly hrany a zajišťovaly tlumení v roztažnosti materiálu a lepší přilnavost mezi hranami a kompozitní tkaninou.



Obrázek 34 Gumové tlumící pásky

5.2.10 Epoxidová pryskyřice

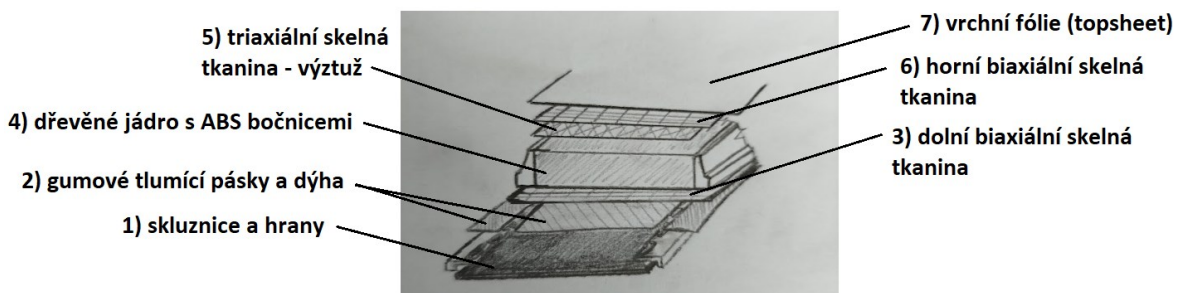
Epoxidová pryskyřice je nanesena na všechny vrstvy lyže od skluznice až po vrchní fólii. Jedná se o reaktoplastickou dvousložkovou epoxidovou pryskyřici míchanou v poměru lepidla vůči tvrdidlu 10:4. Vytvrzovací čas při pokojové teplotě je 90 minut.



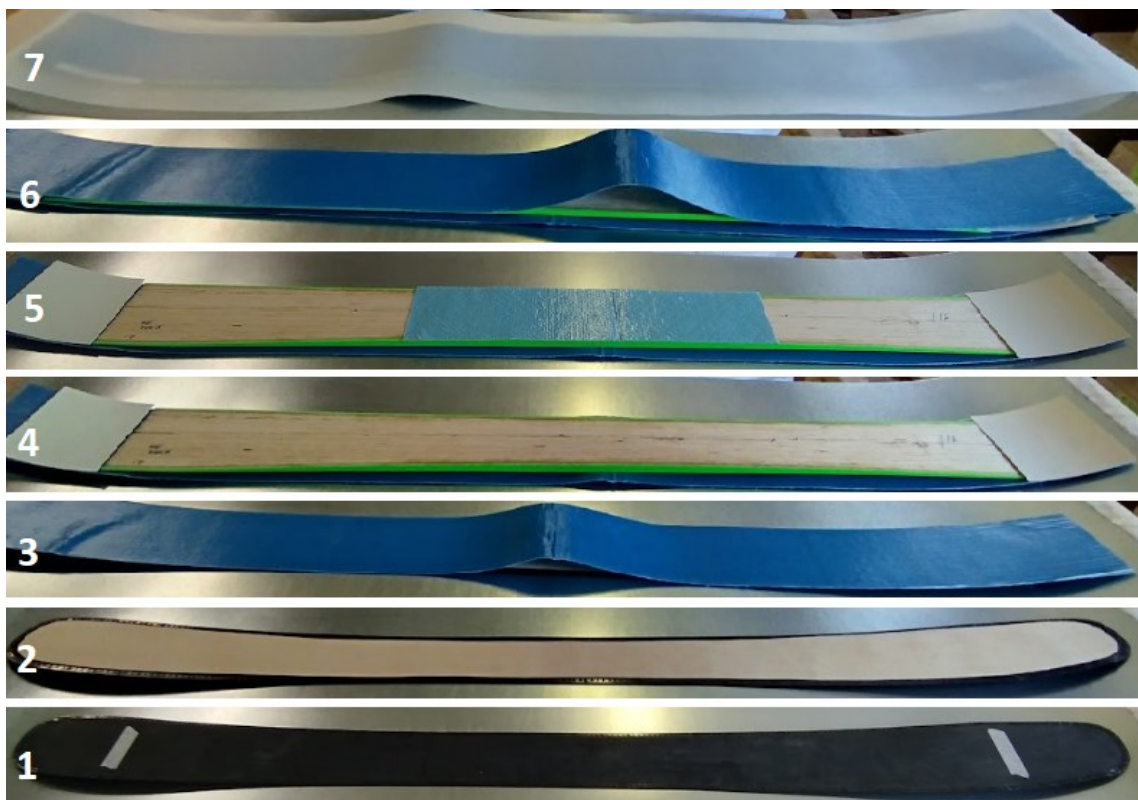
Obrázek 35 Epoxidová pryskyřice použitá při výrobě lyží

5.3 Sendvičová konstrukce lyže

Skladba sendvičové konstrukce lyže je znázorněna na obrázcích níže. První vrstvou je skluznice vyřezaná do daného tvaru lyže a k ní pomocí sekundového lepidla nalepené hrany po celé její délce. Jako druhá vrstva následují gumové tlumící pásy položené na zámky hran a dýha, která je vyřezaná do tvaru lyže tak, aby seděla mezi zámky hran. Třetí vrstva je dolní biaxiální skelná tkanina ve formě prepregu. Čtvrtá vrstva je dřevěné jádro s nalepenými ABS bočnicemi doplněné na koncích o ABS desky pro špičky a paty. Pátá vrstva je triaxiální skelná tkanina ve formě prepregu plnící účel výztuhy, šestá vrstva je horní biaxiální skelná výztuha ve formě prepregu a poslední sedmou vrstvou je vrchní fólie.



Obrázek 36 Schéma uspořádání jednotlivých vrstev v sendvičové konstrukci lyže



Obrázek 37 Pořadí jednotlivých vrstev sendvičové konstrukce

6 TECHNOLOGIE VÝROBY 1 - VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU

První technologie výroby byla zvolena dle aktuálních trendů výroby lyží s ohledem na fakt, že se jedná pouze o výrobu jednoho páru lyží. Bude zde použita jednodílná spodní forma, vakuový pytel a autokláv. Jsou kladeny jednotlivé vrstvy lyže a prosycovány epoxidovou pryskyřicí. Po poskládání všech vrstev lyže do finální podoby jsou lyže vloženy do vakuového pytle, kde vznikne podtlak nutný pro lisování lyží do spodní části formy, představující negativ spodního tvaru lyže. Takto připravené lyže jsou vloženy do autoklávu pro vytvrzení prepregových vrstev a pryskyřice za určené teploty a času. Po uplynutí doby celého procesu jsou lyže vytaženy z autoklávu a opracovány do finální podoby. Nejprve probíhá vyřezání jednotlivých lyží a poté finálního dobroušení skluznic a bočnic. Následuje nabroušení hran a namazání skluznice voskem.

6.1 Výroba formy

Vyráběná forma představuje negativ spodní strany vyráběné lyže. Je třeba přesně definovat její tvar a rozměry, aby výsledná lyže odpovídala požadovaným parametrům, protože velikost a tvar camberu a rockeru hraje velmi zásadní roli pro jízdní vlastnosti lyže.

Jedná se o jednodílnou formu a její protilehlé části není potřeba z důvodu použití vakuového pytle, který zajistí tlak na horní stranu lyží a vylisuje lyže do požadovaného tvaru. Skluznice a hrany lyže jsou v přímém kontaktu s povrchem formy, která je ošetřena separačním nátěrem.

Jako materiál pro výrobu formy byla vybrána dřevěná MDF deska o rozměrech 2800 x 2070 x 25 mm, která představuje nejlevnější variantu materiálu pro výrobu kusové formy, ale stále disponující dostatečnou tuhostí a kvalitou. Na povrch formy bude poté přilepen plech o tloušťce 0,55 mm, který zaručí tvrdý povrch, do kterého se lyže nevlisují. Tento plech je také ošetřen zmíněným separačním nátěrem, který zajišťuje, že po vyjmutí z autoklávu bude možné lyže bez poškození odebrat z povrchu formy.

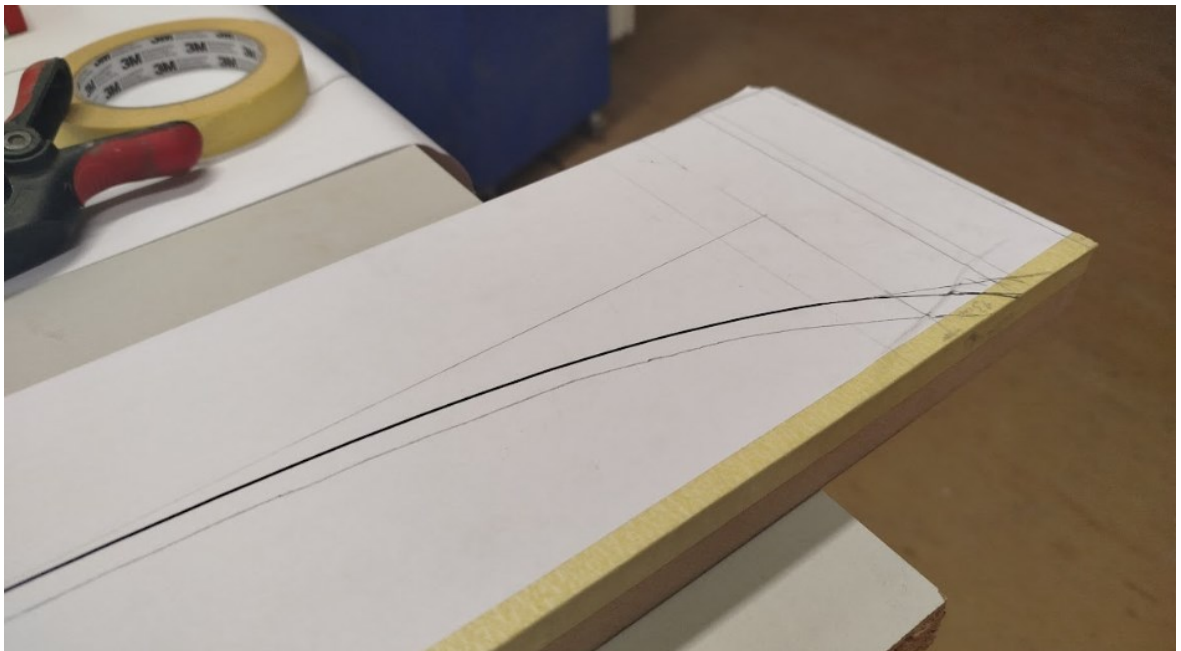
Postup výroby formy:

Výkres půdorysu a bokorysu lyží byl vytisknut na papír v měřítku 1:1.



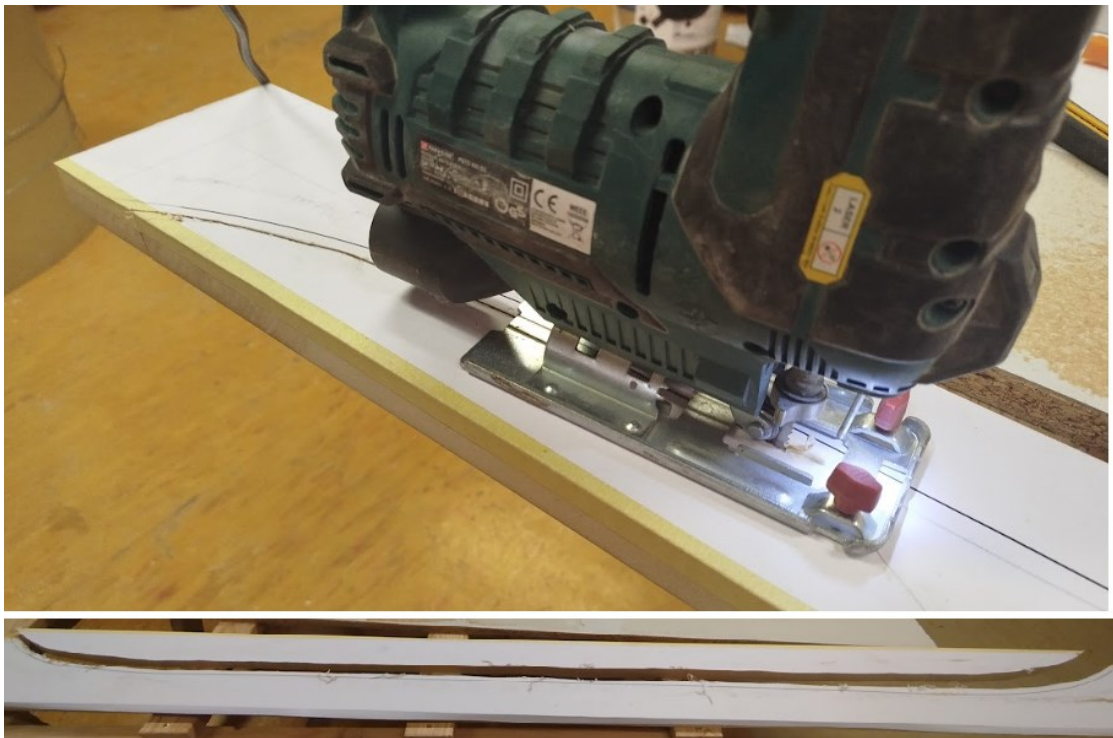
Obrázek 38 Výkres lyží vytištěný na papír v měřítku 1:1

Mdf deska byla na formátovací pile rozřezána na 18 jednotlivých desek o šířce 140 mm a délce 195 mm. Na jednu desku byl přilepen výkres bočního profilu lyže na papíru, pro výrobu šablony formy.



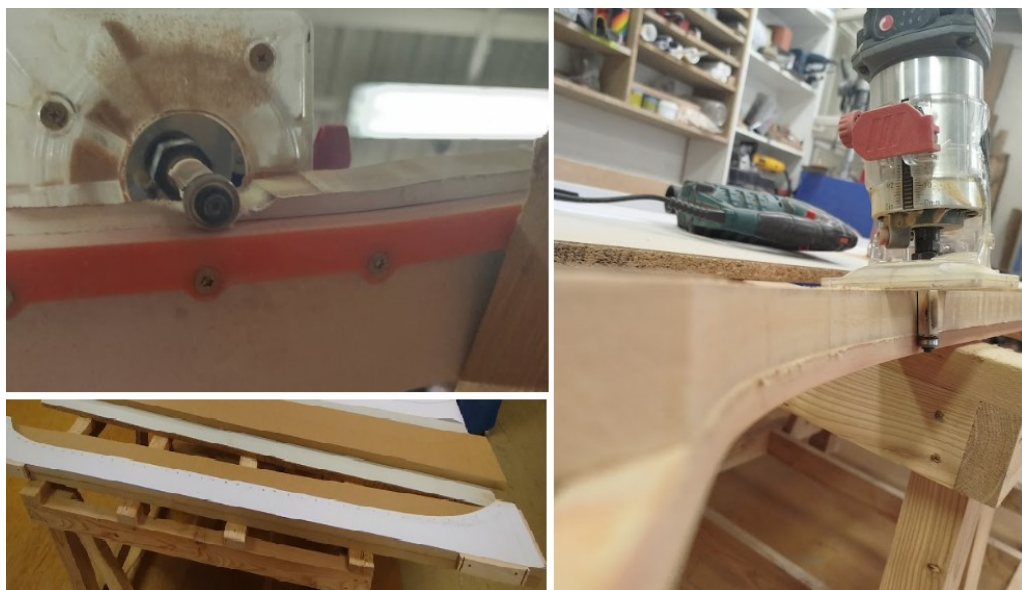
Obrázek 39 Deska s bočním profilem lyže, představující šablonu formy

Hrubý tvar byl vyřezán pomocí přímočaré pily podél bočního profilu lyže.



Obrázek 40 Řezání hrubého tvaru přímočarou pilou

K dosažení přesného tvaru šablony byla použita ruční frézka s kopírovacím ložiskem, která byla vedena podle křivítka.



Obrázek 41 Frézování přesného tvaru pomocí ruční frézky s kopírovacím ložiskem

Takto vytvořená šablona byla použita pro přenesení bočního profilu na ostatní desky. K tomu byla použita spodní frézka vybavena frézou s kopírovacím ložiskem.



Obrázek 42 Přenesení bočního profilu na ostatní desky pomocí šablony

Desky byly dohromady spojeny pomocí disperzního lepidla na dřevo a vrutů. Takto vznikla forma o celkové šířce 450 mm, složená z 18-ti desek o šířce 25 mm. Následně byly jemné nerovnosti povrchu ještě dobroušeny ruční excentrickou bruskou s papírem se zrnitostí P80 a P120.



Obrázek 43 Spojení jednotlivých desek formy pomocí lepidla a vrutů a vybroušení nerovností

Dalším krokem výroby formy bylo nalepení plechu o tloušťce 0,55 mm a rozměrech 450 x 1850 mm. K tomu bylo použito kontaktní lepidlo pro dřevo a kovové povrchy ve spreji.



Obrázek 44 Nalepení plechu na povrch formy za použití kontaktního lepidla ve spreji

Posledním krokem bylo ošetření plechu separační vrstvou, aby bylo možné lyže bez poškození odebrat s formy. K tomu byly použity dva přípravky od firmy ChemTrend. Nejprve byly nanесeny čtyři vrstvy přípravku Zyxax Sealer GP a následně dvě vrstvy Chemlease A2191W. Takto je forma hotová a připravená na výrobu lyží.



Obrázek 45 Ošetření povrchu formy separační vrstvou



Obrázek 46 Výsledná podoba formy pro výrobu lyží

6.2 Kladení jednotlivých vrstev sendvičové konstrukce

Nejprve byla připravena epoxidová pryskyřice v poměru lepidla a tvrdidla 10:4. Od přípravy pryskyřice bylo nutné lyže poskládat dohromady, zabalit do vakuového pytle, připojit k ventilu a vložit do autoklávu v časovém limitu 90 minut. Na každou lyži bylo použito 100 gramů epoxidové pryskyřice. Vrstvy lyže byly kladeny na formu v daném pořadí popsaném v kapitole 5.3 sendvičová konstrukce lyže. Pryskyřice byla roztírána pomocí plastových stěrek v tenké vrstvě, tak aby byla na celé ploše každé vrstvy. Plastové ABS konce lyží byly pomocí sekundového lepidla připevněny k dřevěnému jádru, aby nedošlo k jejich posunutí.

Uložení prepregů se lišilo u každé lyže. Na levou lyži byly prepregové vrstvy umístěny hladkou spodní stranou vzhůru, kdežto na pravou lyži matnou horní stranou vzhůru. Jedná se o experiment, jestli takto změněné uložení kompozitních vrstev bude mít vliv na mechanické vlastnosti nebo vizuální stránku vyrobených lyží. V komerční výrobě jsou prepregy kladeny matnou stranou vzhůru, kvůli lepší přilnavosti matné strany k hladšímu povrchu vrchní fólie.



Obrázek 47 Kladení vrstev sendvičové konstrukce lyže, roztírání pryskyřice a lepení hran

6.3 Zabalení do vakuového pytle

Následovala příprava formy a lyží pro vložení do autoklávu. Zde bylo důležité zajistit, aby se vrstvy lyže neposunuly a z toho důvodu byla použita páska pro upevnění lyží na formě. Dalším krokem bylo přikrytí horní části formy i s lyžemi modrou separační fólií pro ochranu výrobku. Následně byla celá forma s lyžemi zabalena do ochranné tkaniny, aby nedošlo k poškození formy, výrobku a hlavně vakuového pytle. Na ochrannou tkaninu byl nasunut vakuový pytel o šířce 90 cm a zalepen na obou koncích pomocí oboustrannné pásky, určené k uzavírání vakuových pytlů. Na určeném místě mezi oběma lyžemi byl poté připevněn ventil pro připojení k hadici od vývěvy.



Obrázek 48 Zabalení formy s lyžemi do ochranných vrstev a vakuového pytle

6.4 Vytvrzování v autoklávu

Takto připravená forma s lyžemi byla vložena do autoklávu a hadice od vývěvy připojena k ventilu. Jedná se o autokláv italské výroby od značky Panini s maximální nastavitelnou teplotou 250°C, objemem 3770 litrů, maximální délce vkládaného výrobku 2 metry a maximálním nastavitelným vnitřním tlakem 10 barů s vodním chlazením. Proběhlo ověření, že vakuový pytel dobře těsní a poté mohl být autokláv zavřen a předem nastavený program spuštěn.

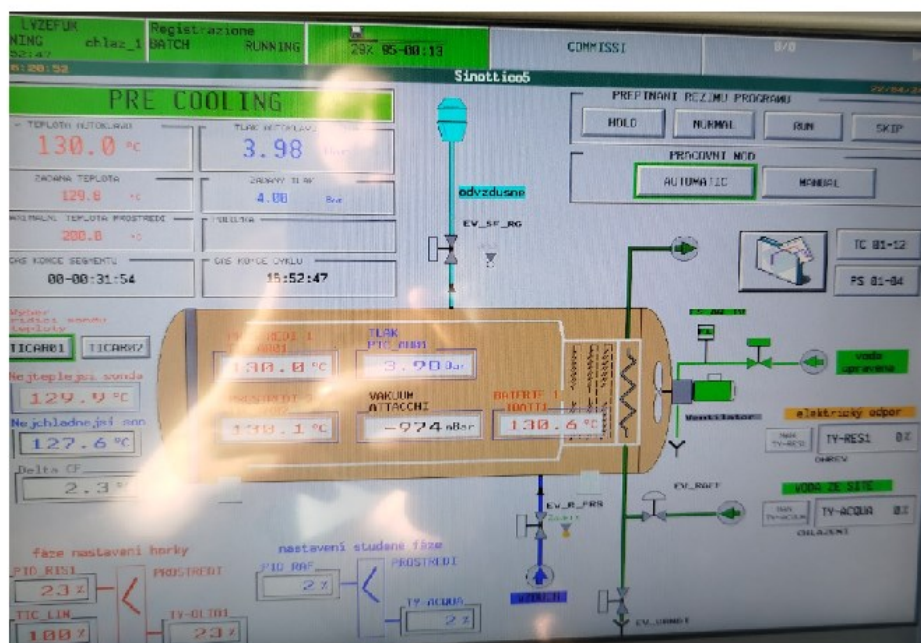


Obrázek 49 Autokláv od italské značky Panini použitý k výrobě lyží

6.4.1 Nastavení programu autoklávu

Byl vytvořen program pro vytvrzení lyží o pěti krocích. Během všech kroků je hodnota podtlaku vývěvy nastavena na -980 Pa. Prvním krokem je start trvající 5 minut a cílovou teplotou 40°C při vnitřním tlaku autoklávu 0 Barů. Následuje druhý krok nazvaný ohřev 1, který trvá 20 minut, při tlaku 2 bary a cílové teplotě 130°C. Krok třetí je výdrž 1, při teplotě 130°C a tlaku 4 bary trvá 90 minut, aby mělo teplo čas prostoupit a ohřát prepregy. Čtvrtý krok je chlazení 1 trvající 32 minut při tlaku 4 bary a cílové teplotě 40°C. Posledním krokem je cooling, kdy je vnitřní tlak autoklávu snížen na 0 barů a teplota ponechána na 40°C.

SP	Start	ohrev1	vydrz_1	chlaz_1	cooling
	00:05:00	00:20:00	01:30:00	00:32:00	00:02:00
PHASE	S to 2.1	S to 2.1	S to 3.0	S to 4.0	S to 0.0
TEMP	S to 40.0	R to 130.0	R to 130.0	R to 40.0	D
TAMB_LIM	S to 200.0	R to 200.0	R to 200.0	R to 200.0	R to 200.0
PRESS	S to 0.0	R to 2.0	R to 4.0	D	R to 0.0
dT_Amb	S to 5.0	S to 5.0	S to 5.0	S to 10.0	R to 10.0
dT_Pz	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0
dT_CF	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0	S to 100.0
Vuoto_Co	S to -980	S to -980	S to -980	S to -980	S to 0.0
Ventilat.	S to 30.0	D	D	D	D

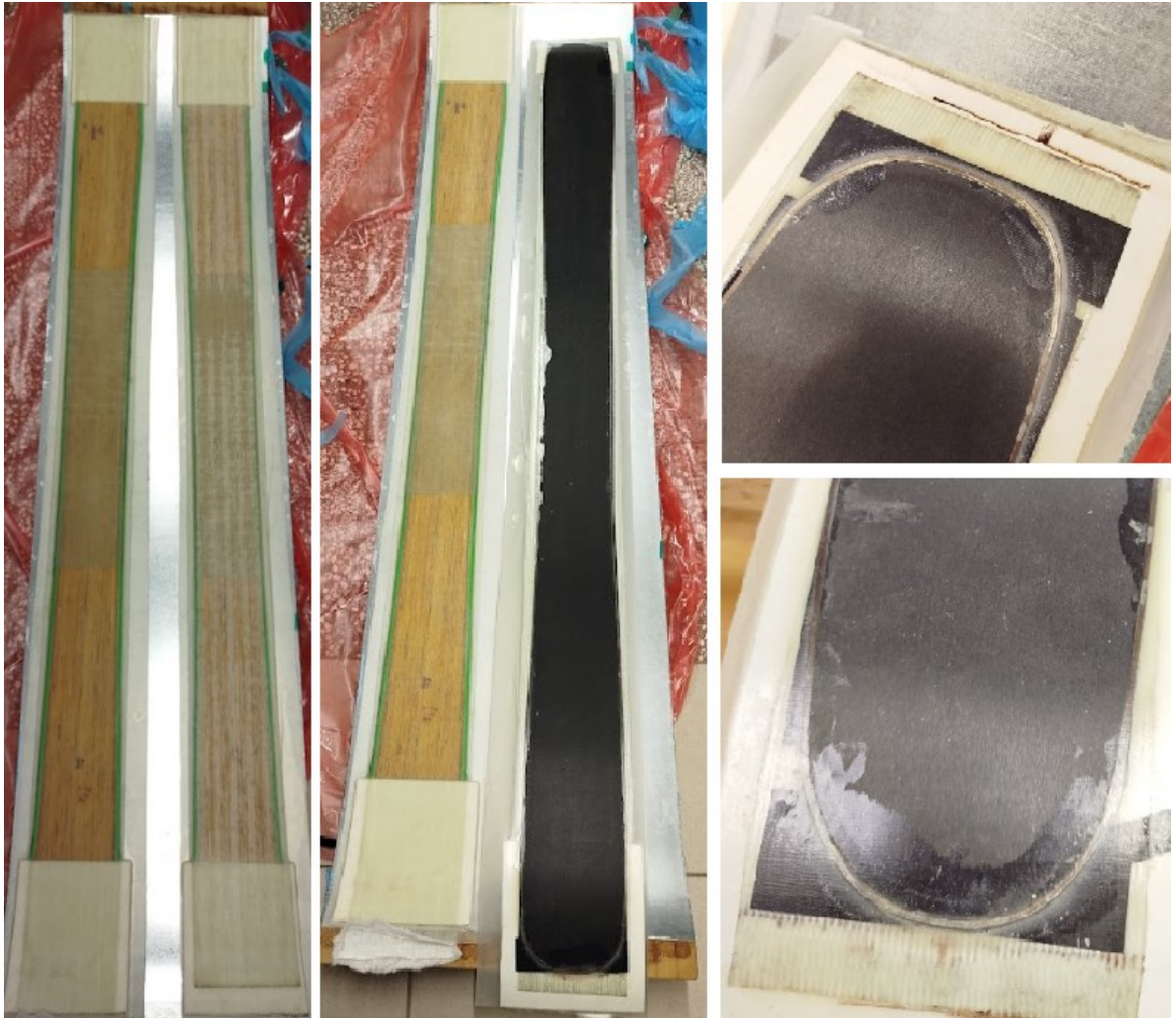


Obrázek 50 Nastavený program autoklávu pro výrobu lyží

Po skončení programu byly lyže okamžitě vyndány ven a ponechány stále zabalené a stlačené ve vakuovém pytli při pokojové teplotě. Rozbaleny byly až následující den.

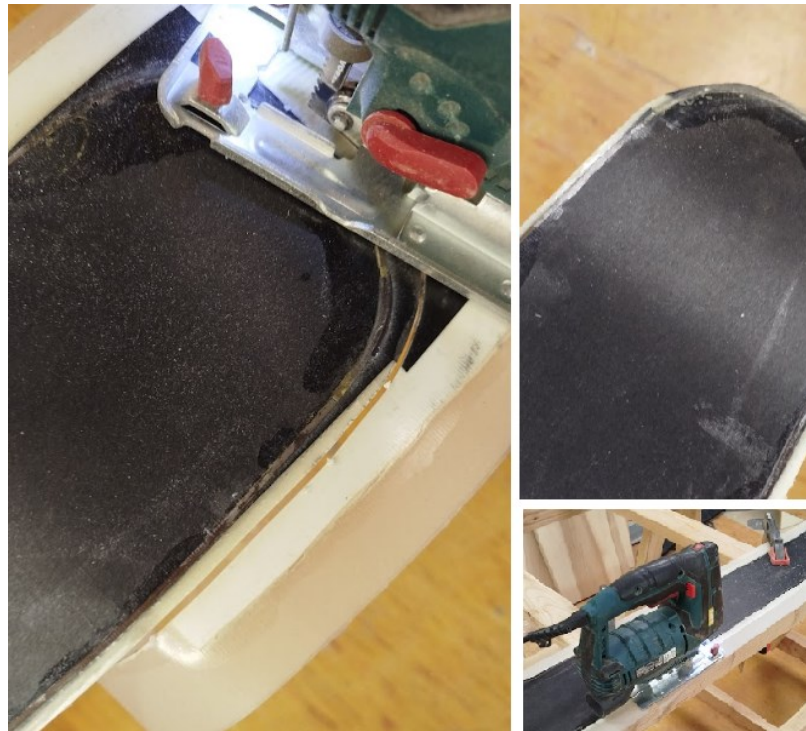
6.5 Finální opracování

Byl odstraněn ventil a vakuový pytel, separační fólie, ochranná tkanina a pásy. Lyže bylo možné vyjmout z formy bez jakéhokoli problému díky separačnímu nátěru. Forma nevykazovala vůbec žádné známky opotřebení.



Obrázek 51 Čerstvě vyjmuté lyže z formy

Proběhlo opracování lyží do jejich finální podoby. K tomu byla nejprve použita přímočará pila pro odstranění přebytečného materiálu na stranách po celé délce lyže.



Obrázek 52 Odřezání přebytečného materiálu přímočarou pilou

Následovalo obroušení zbývajících přebytečného materiálu pomocí stolní brusky až k ocelovým hranám. Následovalo zkosení ABS bočnic pomocí ruční frézky s kopírovacím ložiskem a ruční dočištění smirkovým papírem.



Obrázek 53 Broušení přebytečného materiálu na stolní brusce a sundání ochranné fólie

Posledním krokem bylo broušení skluznice a hran pomocí brusných těles ve formě válců a namazání skluznice voskem.



Obrázek 54 Broušení skluznice a hran vyrobených lyží



Obrázek 55 Finální podoba vyrobených lyží pomocí technologie zpracování v autoklávu

7 TECHNOLOGIE VÝROBY 2 – ZPRACOVÁNÍ VE VYHŘÍVANÉM LISU

LISU

Druhá technologie výroby je lisování lyží ve vyhříváném lisu. Jedná se o metodu používanou ve firmách vyrábějících lyže ve větším množství pro komerční účely. Každá lyže má svoji přesnou dvoudílnou formu z oceli, do které jsou jednotlivé vrstvy lyže vloženy a prosyceny pryskyřicí a poté je z horní strany položena horní část formy. Tento celek je vložen do lisu, kde je za působení tlaku a tepla lyže vytvrzena a následně opracována do finální podoby.

Výroba lyže touto metodou proběhla ve firmě LUSTi a pro výrobu byly použity stejné materiály i stejná skladba sendvičové konstrukce jako pro lyže vyráběné metodou 1. Jediným rozdílem je pata lyže, která je v tomto případě rovná a zakončená plastovým patovým dílem (nedisponuje žádným rockerem). To je z důvodu, že ve firmě nebyla momentálně k dispozici forma s rockerem na obou stranách, nicméně jedná se pouze o minimální modifikaci, která nemá významný vliv na testování kvality vyrobených lyží.

Proběhlo naskládání jednotlivých vrstev lyže do spodní části formy, prosycení pryskyřicí a uložení horní části formy.

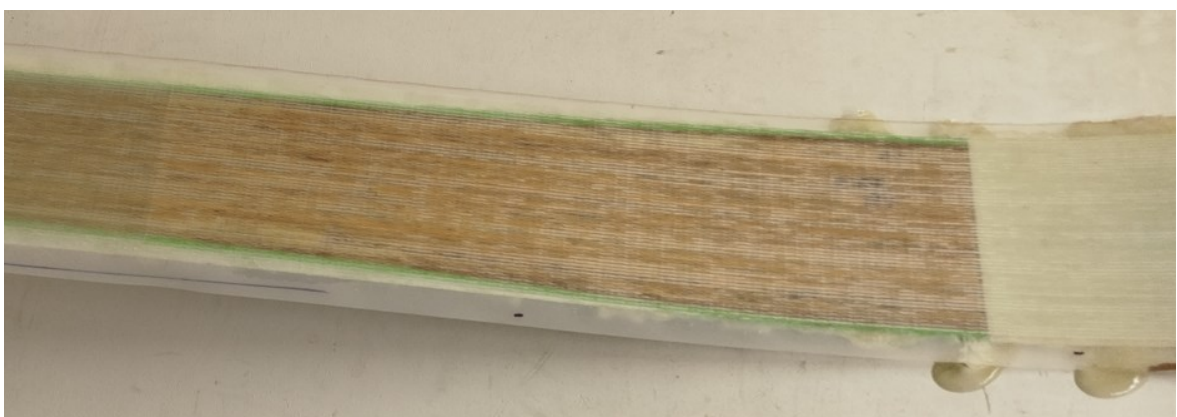


Obrázek 56 Kladení jednotlivých vrstev lyže do formy pro vložení do lisu

Následovalo vložení formy i s lyží do hydraulického lisu vyhřívaného topnými tělesy a chlazeného vodou. Při stlačení lisu byla teplota nastavena na 137°C po dobu 20 minut a následné chlazení vodou po dobu 5 minut.

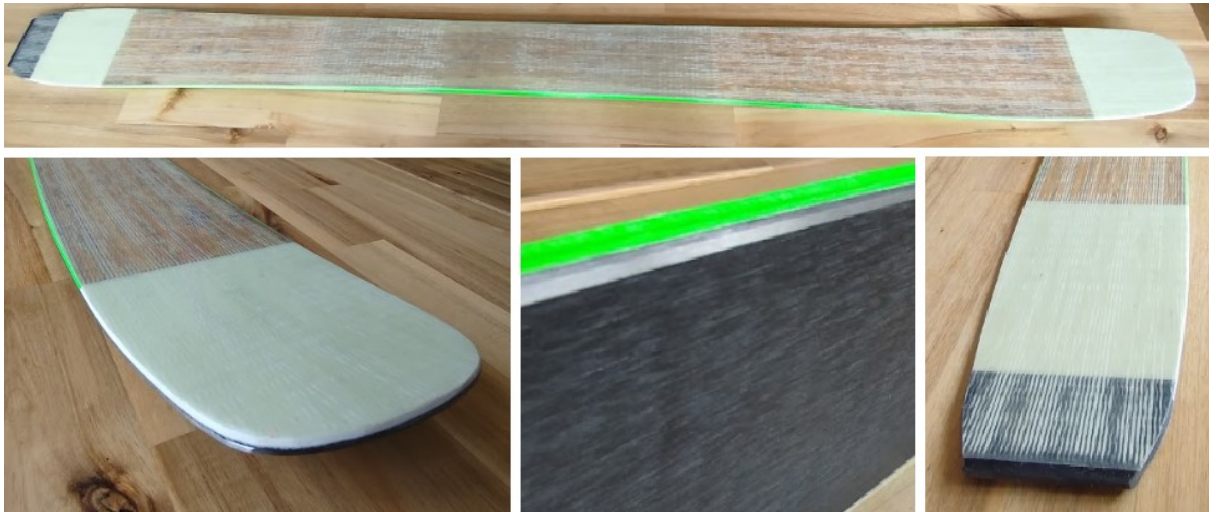


Obrázek 57 Vyhřívaný lis pro lyže



Obrázek 58 Neopracovaná lyže po vyjmutí z lisu

Po vyjmutí z lisu probíhalo opracování podobně jako u předchozí metody a to tak, že lyže byla opracována pomocí ruční a stojanové přímočaré pily a brusných kotoučů do finální podoby. Jako posledním krokem bylo sejmutí ochranné fólie, nabroušení hran a namazání skluznice voskem.



Obrázek 59 Finální podoba lyže vyrobené technologií lisování ve vyhřívaném lisu

7.1 Označení vyrobených lyží pro přehlednost

Pro přehlednost byly lyže označeny písmeny, kdy lyže vyrobená v autoklávu s matnou stranou prepregu vzhůru má písmeno A, lyže s lesklou stranou prepregu vzhůru vyrobená v autoklávu má písmeno B a lyže vyrobená ve vyhřívaném lisu je označena písmenem C.



Obrázek 60 Označení vyrobených lyží písmeny A, B, C pro přehlednost

8 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Všechny tři vyrobené lyže byly zkoušeny na standardizované nedestruktivní zkoušky mechanických vlastností. První zkouškou byla zkouška pružnosti lyže a druhá byla zkouška torzní tuhosti. Obě měření proběhly na strojích ve firmě KÄSTLE. Cílem těchto měření je zjistit a porovnat kvalitu vyrobených lyží, které byly vyrobeny dvěma rozdílnými technologiemi.

Jako referenční hodnoty jsou považovány hodnoty naměřené na lyži C (vyrobené ve vyhřívaném lisu), které jsou zvýrazněny oranžově. Tato lyže je vyrobena komerční technologií výroby a splňuje požadavky na kvalitní zpracování freeridové lyže, dle norem komerční výroby.

8.1 Zkouška pružnosti lyže

Zkoušení probíhalo na zakázku vyrobeném stroji, který je určený pro zkoušení pružnosti lyží. Lyže je položena na dvě podpory, které jsou umístěny v určitých vzdálenostech podle toho, kterou část lyže chceme testovat. Z horní části působí zatěžující těleso, zde ve formě válcové hrazdy. Zatěžující síla je předepsaná na 300 N. Zatěžující těleso nejprve najede na povrch lyže a poté vyvine plnou sílu. Měří se vzdálenost v milimetrech, do které se těleso dostalo přes odpor lyže. Výsledná hodnota se zobrazí na displeji, pod kolonkou popsanou jako měření tvrdosti. Každá lyže byla zkoušena v pěti pozicích, a to:

- **Střed lyže** – zatěžující síla působí ve středu lyže (ve vzdálenosti 895 mm od obou konců), podpory umístěny 300 mm na obě strany od středu.
- **Zadní část lyže** – tímto je myšlena část mezi zadním kontaktním bodem a středem lyže. Podpory umístěny v zadním kontaktním bodě (250 mm od paty lyže) a na středu lyže. Zatěžující síla působí přesně mezi těmito body, tedy v pozici 322,5 mm od středu lyže.
- **Přední část lyže** - tímto je myšlena část mezi předním kontaktním bodem a středem lyže. Podpory umístěny v předním kontaktním bodě (365 mm od špičky lyže) a na středu lyže. Zatěžující síla působí přesně mezi těmito body, tedy v pozici 265 mm od středu lyže.
- **Vzdálenost 1175 mm** – jedná se o vzdálenost mezi kontaktními body lyže, zatěžující síla působí ve středu lyže a podpory jsou umístěny ve vzdálenosti 587,5 mm na obě strany od středu.

- **Vzdálenost 1275 mm** - jedná se o vzdálenost mezi kontaktními body a konci lyže, podpory jsou umístěny ve vzdálenosti 637,5 mm na obě strany od středu lyže, kde opět působí zatěžující síla.



Obrázek 61 Stroj na měření pružnosti lyží



Obrázek 62 Prohnutá lyže v průběhu měření pružnosti

Zde jsou výsledné naměřené hodnoty pro zkoušení pružnosti vyrobených lyží zapsány v tabulce (jednotky v milimetrech):

Tabulka 5 Výsledné naměřené hodnoty testování pružnosti vyrobených lyží

	Označení lyže		
	A	B	C
Střed lyže	10,1	9,7	9,9
Zadní část lyže	13,3	13,3	13,1
Přední část lyže	11,3	10,9	11,1
Vzdálenost 1175 mm	30,75	30,4	30,15
Vzdálenost 1275 mm	41,6	40,9	40,97

Dle těchto naměřených hodnot lze vypočítat konstantu tuhosti pružení c , která jasně vypovídá o pružnosti lyže. Je vypočítána ze vzorce aplikované síly F v Newtonech k prohnutí lyže f v milimetrech. Pro konstantu tuhosti pružení středu lyže A je výpočet následovný:

$$c_M = \frac{F}{f} = \frac{300}{10,1} = 29,7 \quad (1)$$

Vztah pro výpočet konstanty tuhosti pružení (1). Čím je konstanta tuhosti pružení nižší, tím pružnější lyže je a naopak vysoká hodnota konstanty tuhosti pružení definuje tuhou lyži.

Tabulka 6 Tabulka udávající konstanty tuhosti pružení c jednotlivých částí lyží

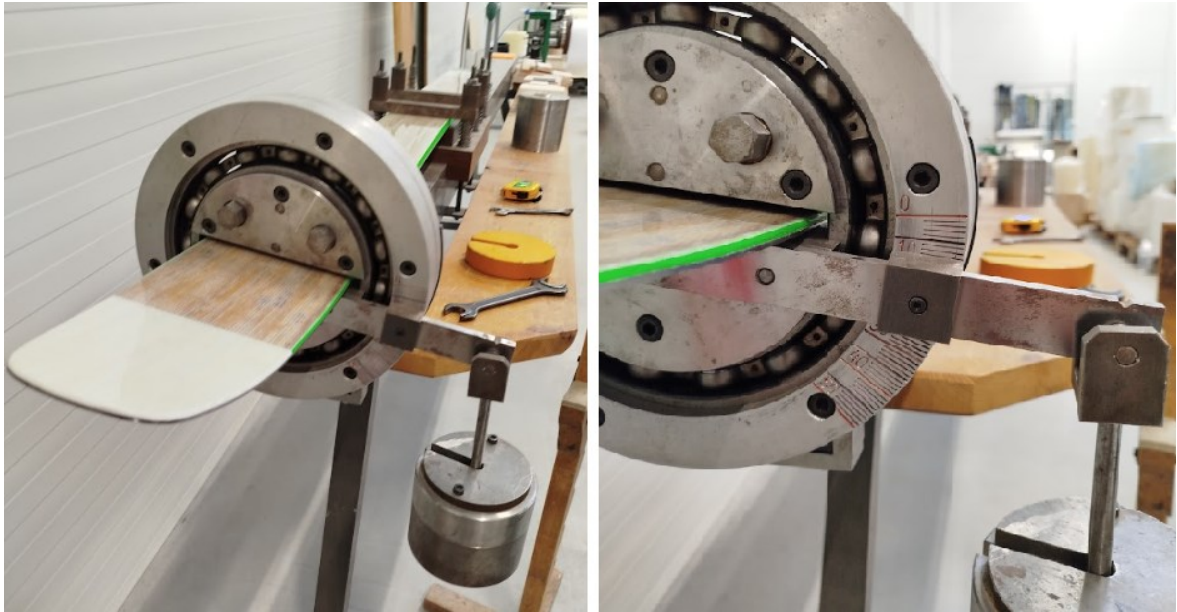
	Označení lyže		
	A	B	C
Střed lyže (c_M)	29,7	30,93	30,3
Zadní část lyže (c_A)	22,56	22,56	22,9
Přední část lyže (c_B)	26,55	27,5	27,03
Vzdálenost 1175 mm (c_{1175})	9,76	9,87	9,95
Vzdálenost 1275 mm (c_{1275})	7,21	7,33	7,32

8.2 Zkouška torzní tuhosti lyže

Na torzní tuhost byly testovány paty a špičky vyrobených lyží. Při každém měření bylo upínací zařízení vzdáleno 650 mm od testovaného konce lyže. Byly použity dvě závaží, kdy první generovalo moment 20 Nm a druhé 30 Nm. Po upnutí lyže bylo dané závaží umístěno na držák s pákou, který zatížil a zkroutil zkoušenou část lyže. Výsledná hodnota byla odečítána ze stupnice zobrazené na zařízení, která udává hodnotu úhlu, o který se lyže zkroutila ve stupních.



Obrázek 63 Zařízení na měření torzní tuhosti lyží



Obrázek 64 Zkroucená lyže během testování torzní tuhosti

Zde jsou výsledné naměřené hodnoty ve stupních zapsány do dvou tabulek, první tabulka udává hodnoty naměřené při použití závaží generujícím moment 20 Nm a druhá při použití závaží generujícím moment 30 Nm.

Tabulka 7 Výsledné hodnoty zkroucení lyží ve stupních při momentu 20 Nm

20 Nm	Označení lyže		
	A	B	C
Špička	8°	8°	8,5°
Pata	10°	10°	10°

Tabulka 8 Výsledné hodnoty zkroucení lyží ve stupních při momentu 30 Nm

30 Nm	Označení lyže		
	A	B	C
Špička	10°	10,5°	11°
Pata	13,5°	13,5°	13,5°

Dle těchto naměřených hodnot lze vypočítat konstantu torzní tuhosti c_T . Je vypočítána ze vzorce aplikovaného momentu M v Newton metrech ke zkroucení lyže α ve stupních. Pro konstantu torzní tuhosti lyže A, je výpočet při testování špičky lyže a použití závaží generujícího moment 20 Nm následující:

$$c_T = \frac{M}{\alpha} = \frac{20}{8} = 2,5 \quad (2)$$

Vztah pro výpočet konstanty torzní tuhosti (2). Čím je konstanta torzní tuhosti vyšší, tím je lyže tužší a tvrdší a naopak při nižší konstantě torzní tuhosti je lyže pružnější a měkčí.

Tabulka 9 Hodnoty torzní tuhosti pro závaží 20 Nm

20 Nm	Označení lyže		
	A	B	C
Špička	2,5	2,5	2,35
Pata	2	2	2

Tabulka 10 Hodnoty torzní tuhosti pro závaží 30 Nm

30 Nm	Označení lyže		
	A	B	C
Špička	3	2,86	2,73
Pata	2,22	2,22	2,22

9 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

9.1 Váha lyží

- Váha lyže A je 2005 gramů
- Váha lyže B je 1990 gramů
- Váha lyže C je 1950 gramů

Co se váhy týče, je zřejmé, že lyže C bez rockeru na patě bude nejlehčí, jelikož je zde méně materiálu než u lyží s rockerem na obou koncích. Tyto lyže jsou těžší, jelikož je zde více ABS plastové výztuhy a taktéž více kovových hran. Rozdíl ve váze mezi lyžemi A a B vyráběnými v autoklávu, může být způsoben nepřesností při ubírání materiálu při dokončovacích operacích, většímu množství pryskyřice, která se při lisování nevytlačila z lyže ven, ale vytvrdila se uvnitř lyže, popřípadě rozdílnou váhou dřevěných jader. Rozdíl 15 gramů mezi lyžemi A a B je nicméně zanedbatelný a nebude hrát žádnou roli na jízdni vlastnosti lyží.

9.2 Vyhodnocení zkoušek mechanických vlastností

Z hodnot konstanty tuhosti pružení lze vyčíst, že u všech třech lyží je nejtužší středová část lyže s triaxiální výztuhou (hodnota konstanty tuhosti pružení ± 30). Při měření mezi kontaktními body je tuhost lyží jen asi třetinová oproti tuhosti středu. Největší pružnost byla naměřena při podporách umístěných nejbližše koncům lyží (vzdálenost 1275 mm), což odpovídá, jelikož zde jsou lyže nejtenčí (hodnota konstanty tuhosti pružení okolo 7,3).

Při měření pružnosti se ukázalo, že lyže B má některé hodnoty tuhosti pružení lehce vyšší než lyže A a C. Jedná se však o tak nepatrné rozdíly, že nelze konstatovat, že by opačně uložená skelná tkanina u lyže B změnila vlastnosti pružnosti.

Vyhodnocení výsledků měření torzní tuhosti ukazuje, že tuhosti pat lyží jsou totožné a jediný rozdíl nastává při měření špiček lyží s větším závažím, kdy hodnoty ukazují, že lyže A a B z autoklávu mají lehce vyšší tuhost špičky, než lyže C z lisu. Dále je zřejmé, že přední část lyží má větší torzní tuhost než zadní část, což je způsobeno jejich šířkou, kdy přední část je širší než zadní, což je také důvodem vyšší tuhosti a to přibližně o 20%.

Celkově lze říci, že se naměřené hodnoty všech lyží liší jen minimálně. A tedy že lyže A a B vyrobené v autoklávu mají téměř identické mechanické vlastnosti jako lyže C vyrobená

ve vyhřívaném lisu. To dokazuje, že metoda výroby lyží v autoklávu umožňuje vyrobit lyže o stejných mechanických vlastnostech a kvalitě, jako výroba komerční metodou.

9.3 Vyhodnocení vizuální kvality

9.3.1 Kvalita povrchu

Lyže C vyráběná ve vyhřívaném lisu dosáhla nejlepší kvality povrchu. Vrchní fólie je perfektně hladká a triaxiální výztuha je zde skvěle zapuštěna, takže povrch lyže je velmi rovný. Skluznice je také rovná a bez jakýchkoli vad. Takto dobře zpracovaná lyže je výsledkem přesně vyrobené formy na lyže a zpracováním ve vyhřívaném lisu, který už byl nastaven na výrobu lyží a vyvinul dostatečný tlak a teplotu.

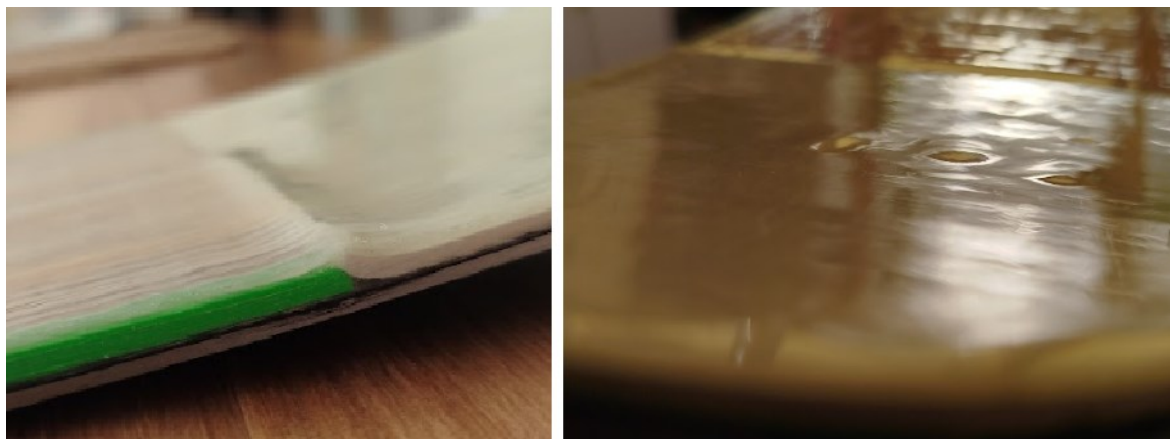
Lyže vyráběné pomocí vakuového pytle a autoklávu vykazují o něco méně hladký povrch. Jak u lyže A, tak u lyže B je více patrná struktura kompozitních tkanin umístěných pod vrchní fólií a triaxiální výztuha zde tvoří mírný výstupek nad jinak relativně rovný povrch. To je pravděpodobně způsobeno možnostmi vakuového pytle. I přes dodatečný tlak 4 barů uvnitř autoklávu, nedosáhla tato metoda dokonalého a rovnoměrného stlačení. Přesný horní díl formy při stlačení lisu má tím pádem lepší vliv na rovný a hladký povrch lyže.

9.3.2 Vady

U lyží A a B vyráběných v jednodílné formě je náročnější zajistit přesné umístění vrstev na sebe, zejména aby nedošlo k přesazení dřevěného jádra a skluznice s hranami. U lyže A se to povedlo zajistit velmi dobře, kdy jádro, respektive jeho zelené ABS hrany jsou symetrické v celé délce lyže. U lyže B došlo k lehkému přesazení jádra a jeho posunutí na pravou stranu. Jednalo se však o malý posun, takže při finálním opracování bočnic bylo stále možné odebrat materiál a dostat dobrý výsledek.

Jednou z dalších výzev výroby lyží metodou s autoklávem je zajištění, aby se po uzavření pytle a odsátím vzduchu neposunuly plastové ABS konce špiček a pat lyží. To se povedlo u tří ze čtyř konců. U lyže A patový díl nepřesně dosednul do poloviny šířky lyže, což zapříčinilo lehký výčnělek na povrchu.

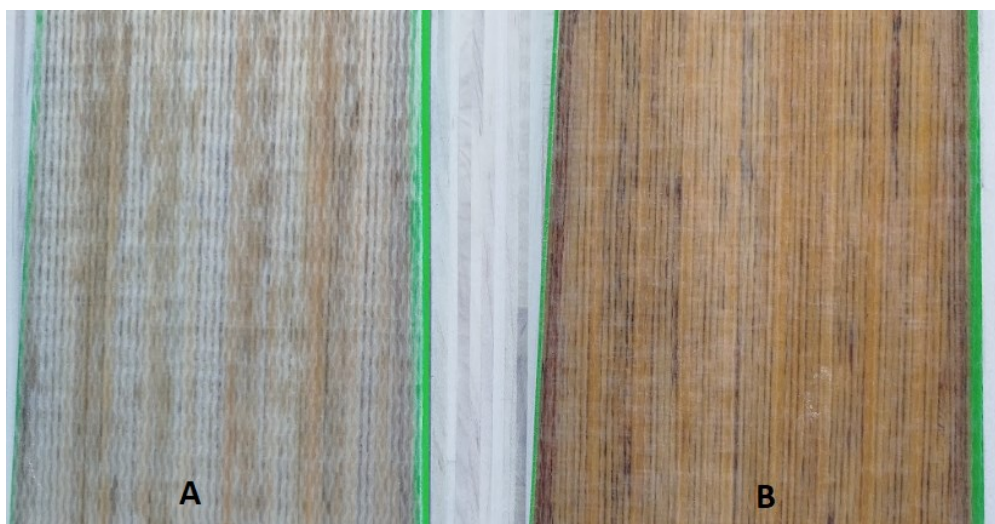
Poslední nedokonalostí jsou malé bubliny na patové části lyže B. Tyto bubliny mohou být způsobeny uvíznutím vzduchu pod vrchní fólií při postupném stlačování vakuového pytle.



Obrázek 65 Vady vzniklé na lyžích A a B vyráběných v autoklávu

9.3.3 Uložení biaxiálních prepregových vrstev

Vizuální výsledky experimentu s opačným uložením skelných biaxiálních kompozitních tkanin, které jsou umístěny hned pod vrchní fólii je zřejmý na první pohled. Lyže A, kde byl prepreg uložen matnou stranou nahoru má mnohem výraznější viditelnou strukturu vláken, kdy jsou dřevěné jádro a triaxiální výztuha nacházející se pod prepregem z velké části touto strukturou překryté. Kdežto lyže B, kde byla skelná tkanina umístěna hladkou stranou nahoru, vykazuje velmi transparentní optické vlastnosti povrchu. Dřevěné jádro i triaxiální výztuha jsou zde velmi jasně viditelné a struktura vláken nepatrná. Z designového hlediska při použití transparentního topsheetu bez potisku, považují lyži B s uložením hladkého povrchu prepregu vzhůru za pohlednější, jelikož více vynikne struktura dřeva.



Obrázek 66 Vizuální rozdíl vrchní části lyží způsobený rozdílným uložením skelných tkanin

9.4 Porovnání výrobních technologií

Dle výše uvedených výsledků je zřejmé, že pomocí technologie vakuového pytle a autoklávu je možné vyrobit lyže o stejných mechanických vlastnostech a vyhovující kvalitě jako komerční technologií vyhřívaného lisu na lyže.

Výrobní technologie s vakuovým pytle a autoklávem je vhodná pro kusovou výrobu lyží. Výroba formy ze dřeva a plechu je sice levná, nicméně skládání jednotlivých vrstev lyže do formy představuje určitou výzvu. Následné zabalení formy i s lyžemi do vakuového pytle a vložení do autoklávu je pak časově náročné a vytváří prostor pro chyby a nepřesnosti. Při možnosti přístupu k autoklávem je však tato metoda pro kusovou výrobu dostačující.

Komerční technologie výroby za použití speciálního vyhřívaného lisu na lyže a přesné dvoudílné ocelové formy je zase vhodná pro výrobu většího množství lyží. Lyže vyrobené touto metodou dosahují lehce lepší kvality povrchu a kladení vrstev lyže do přesné formy výrazně eliminuje prostor pro chyby. Výroba je tím pádem jednodušší a časová náročnost o poznání nižší. Přesně z těchto důvodů je tato metoda používána ke komerční výrobě lyží.

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce byly nejprve obecně popsány kompozitní materiály, jejich historie, definice, základní vlastnosti a rozdělení dle hlavních aspektů týkajících se hlavně výztuže a matrice. V další kapitole byly popsány vybrané technologie zpracování kompozitních materiálů, jejich výhody, nevýhody a použití. Následující kapitola se věnuje sjezdovým lyžím. Pojednává o historii jejich výroby, jejich typech, konstrukčních řešeních a používaných technologiích, které ovlivňují jízdní vlastnosti. Nakonec uvádí vybrané nedestruktivní mechanické zkoušky sjezdových lyží dle norem ISO.

Praktická část začíná vytyčením cílů diplomové práce. Následuje kapitola konstrukční řešení vyráběných lyží, ve které je objasněno určení, typ, design lyží a nákres hlavních rozměrů. Dále jsou zde uvedeny materiály použité k výrobě s jejich hlavními údaji a také skladba sendvičové konstrukce a jednotlivých vrstev lyží.

Další kapitola popisuje podrobně první technologii výroby jednoho páru lyží za použití jednodílné spodní formy, vakuového pytle a autoklávu. Je zde popsána výroba formy, následné připravení materiálu a kladení jednotlivých vrstev lyží, zabalení do vakuového pytle, vložení do autoklávu, nastavení programu pro vytvrzení a poté vyjmutí z formy a finální opracování lyží do konečné podoby. Jedna lyže byla vyrobena s biaxiálními skelnými tkaninami ve formě prepregu umístěnými matnou stranou vzhůru a druhá lesklou stranou vzhůru. Následující kapitola popisuje proces druhé technologie výroby za pomoci vyhřívaného lisu na lyže ve firmě LUSTi.

Následně byly lyže označeny písmeny A, B, C pro přehlednost. A – lyže vyrobená v autoklávu s matnou stranou prepregu vzhůru, B – lyže vyrobená v autoklávu s lesklou stranou prepregu vzhůru a C – lyže vyrobená komerční metodou ve vyhřívaném lisu pro lyže.

Následovalo testování vyrobených lyží na zkoušky mechanických vlastností ve firmě KÄSTLE. První byla zkouška pružnosti, kdy byla každá lyže zkoušena v pěti místech pomocí dvou podpor a zatěžujícího tělesa se silou 300 N a byl měřen průhyb lyže. Druhá byla zkouška torzní tuhosti, za použití dvou závaží generující moment 20 a 30 Nm. Proběhlo zkoušení lyží na špičce a patě. Výsledky měření byly zapsány do tabulek a provedeny přepočty na konstanty tuhosti pružení a konstanty torzní tuhosti. Tyto konstanty byly následně porovnávány a použity k vyvození výsledků.

Při testování pružnosti se ukázalo, že nejtužší je střed lyže, kde má dřevěné jádro největší tloušťku a je zde umístěna triaxiální skelná výztuha, která zachytává podélnou a příčnou tuhost (hodnota konstanty tuhosti pružení je zde okolo 30). Nejměkčím bodem lyží jsou naopak tenké konce u špiček a pat (hodnota konstanty tuhosti pružení okolo 7,2).

Z hodnot měření torzní tuhosti je patrné, že přední část má díky větší celkové šířce vyšší tuhost, než část zadní a to přibližně o 20%. Jinak se ale hodnoty torzních tuhostí pro všechny tři lyže nijak zásadně neliší.

Výsledky z testování lyží na pružnost a torzní tuhost ukazují, že všechny tři vyrobené lyže mají téměř identické mechanické vlastnosti. Ukázalo se, že uložení skelné biaxiální tkaniny matnou či lesklou stranou vzhůru nehraje roli na mechanické vlastnosti lyží.

Váhy lyží A (2005 g) a B (1990 g) jsou s rozdílem 15 gramů zanedbatelné a způsobené pravděpodobně nepřesností při přípravě materiálu nebo finálním opracování. Lyže C (1950 g) je lehčí o několik desítek gramů z důvodu, že nemá rocker na patě, tudíž je zde méně materiálu.

Následuje kapitola vyhodnocení vizuální kvality, kde je porovnáván velmi rovný a hladký povrch lyže C vyrobené v lisu s o něco méně rovným a hladkým povrchem lyží A a B z autoklávu. Tento rozdíl je způsoben použitím metody vakuového pytle, který nevyvine tak rovnoměrnou lisovací sílu jako lis na lyže. Dále jsou popsány vady výroby na lyžích A a B, kterými je jedno nedosednutí patové ABS části lyže, malé bubliny na patové části a lehce posunutá jádra u lyže B. Tyto drobné vady však nehrají výraznou roli na jízdní či mechanické vlastnosti lyží.

Nakonec je ještě porovnávána vizuální stránka lyže A a B, kdy uložení skelné biaxiální tkaniny lesklou stranou vzhůru u lyže B tvoří více transparentní povrch a dává více vyniknout dřevěnému jádru než u lyže A.

Při porovnání použitých metod výroby lyží je výsledek ten, že pro kusovou výrobu lyží se více hodí technologie výroby v autoklávu. Je časově výrazně náročnější zabalit formu i s lyžemi do vakuového pytle. Taktéž zajištění, aby byly vrstvy lyže umístěny přesně na sebe, představuje výzvu a proto je zde větší prostor pro vznik vad během výroby. Výroba jednodílné formy je však jednodušší a kvalita vyrobených lyží touto metodou je dostačující. Technologie výroby ve vyhřívaném lisu a přesné dvoudílné formě se poté více hodí pro výrobu většího množství lyží s důrazem na úsporu času a konzistentnost kvality vyrobených

lyží. Výsledky této metody dosahují lehce lepších vizuálních výsledků, co se týče kvality povrchu.

Byly tedy splněny cíle diplomové práce. Z celkového vyhodnocení výsledků lze konstatovat, že metodou použití vakuového pytle a vytvrzení v autoklávu lze docílit výroby lyží o stejných mechanických vlastnostech a vyhovující kvalitě, jako při výrobě lyží pomocí přesné dvojdílné formy a vyhřívaného lisu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Composite and Nanocomposite Materials - From Knowledge to Industrial Applications. Online. Intechopen. 2020, s. 240. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80186>. [cit. 2024-03-05].
- [2] EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351s, ISBN 978-80-86960-29-6, 2009.
- [3] DANIEL, Isaac M. a Ori ISHAI. Engineering mechanics of composite materials. New York: Oxford University Press, 1994. ISBN 0-19-509738-6
- [4] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 9788073722791.
- [5] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80708-0568-4.
- [6] KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity. Online. 2017, s. 44. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>. [cit. 2024-03-05].
- [7] LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. Online. In: s. 25. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3099070/>. [cit. 2024-03-05].
- [8] KRISHAN K. CHAWLA. Composite materials: Science and Engineering. USA: Springer Science+Business Media, Inc., 1998. Second Edition. ISBN 0-387-98409-7. Dostupné z: books.google.cz
- [9] A. BRENT STTRONG. Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications. USA: Society of Manufacturing Engineers, 2008. Second Edition. ISBN 0- 87263-854-5. Dostupné z: books.google.cz
- [10] HULL, D. a CLYNE, T.W. An introduction to composite materials. Cambridge University Press, 1996. ISBN 9780521388559.
- [11] Polymer Matrix Composites: chapter 3. Online. In: Materials by design. Princeton University, s. 25. Dostupné z: <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880106.PDF>. [cit. 2024-03-07].
- [12] CHAWLA, Krishan K. Composite Materials: Science and Engineering. 4th ed. Springer. ISBN 978-3030289829.
- [13] CHUNG, Deborah D. L. *Composite Materials: Science and Applications*. 2nd ed. edition (29 Mar 2010). New York: Springer; 2010, xii, s. 884. ISBN 978-1-84882830-8.

- [14] CHAWLA, Krishan K. a CHAWLA, Nikhilesh. Metal Matrix Composites. 2nd ed. Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-9547-5.
- [15] JANOVEC, Jiří; CEJP, Jiří a STEIDL, Josef. Perspektivní materiály. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [16] SP, systems. Composite engineering materials. Online. In: . 2013, s. 69. Dostupné z: https://composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/SP_Composites_Guide.pdf. [cit. 2024-03-08].
- [17] FIGUEIREDO, J. L.; BERNARDO, C. A.; BAKER, R. T. K. a , K. J. (ed.). Carbon Fibers Filaments and Composites. 1. Springer Dordrecht, 1989. ISBN 978-0-7923-0602-3.
- [18] CHUNG, Deborah D.L. Carbon Fiber Composites. Butterworth-Heinemann, 1994. ISBN 9780750691697.
- [19] DE MERCHANT, Christine. Carbon Fiber Characteristics. Online. In: . Dostupné z: <https://www.christinedemerchant.com/carboncharacteristics.html>. [cit. 2024-03-08].
- [20] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: Vysoké učení technické, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [21] DAVE, Raju S a LOOS, Alfred C. (ed.). Processing of Composites. 1. Hanser Publishers, 2000. ISBN 978-3-446-18044-4.
- [22] AZEEM, Mohammad; YA, Hamdan Haji; ALAM, Mohammad Azad; KUMAR, Mukesh; STABLA, Paweł et al. Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review. Online. Journal of Energy Storage. 2022, s. 49. ISSN 2352-152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468>. [cit. 2024-03-11].
- [23] Ruční laminace. Online. In: Plastic.cz. Dostupné z: https://www.plastic.cz/technologie-rucni_laminace. [cit. 2024-03-12].
- [24] Infuze. Online. In: Plastic.cz. Dostupné z: <https://www.plastic.cz/technologie-infuze>. [cit. 2024-03-12].
- [25] Composite spray molding. Online. In: Manufacturing Guide Sweden AB. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/composite-spray-molding>. [cit. 2024-03-12].
- [26] KOPELIOVICH, Dmitri. Composites: Closed mold fabrication of Polymer Matrix Composites. Online. In: SubsTech. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=closed_mold_fabrication_of_polymer_matrix_composites. [cit. 2024-03-12].

- [27] LEE, Jeong-Min; KIM, Byung-Min a KO, Dae-Cheol. Development of vacuum-assisted prepreg compression molding for production of automotive roof panels. Online. In: *Composite Structures*. S. 8. ISBN 0263-8223. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822318315009#f0005>. [cit. 2024-03-12].
- [28] The evolution of skis to the present day. Online. In: <https://www.valthorens.com/>. Dostupné z: <https://www.valthorens.com/en/levolution-des-skis/>. [cit. 2024-03-13].
- [29] History of Skiing. Online. In: *Freethepowder*. Dostupné z: <https://www.freethepowder.com/pages/history-of-skiing>. [cit. 2024-03-13].
- [30] The FIS Disciplines. Online. In: *Fis-ski*. Dostupné z: <https://www.fis-ski.com/en/inside-fis/about-fis/general/the-fis-disciplines>. [cit. 2024-03-14].
- [31] DALE, Patrick. Types of Skis: Visual Guide With Pros and Cons. Online. In: *Coolofthewild*. Dostupné z: <https://coolofthewild.com/types-of-skis/>. [cit. 2024-03-14].
- [32] SKI BUYER'S GUIDE, PART 4: SKI MATERIALS. Online. In: *Wagnerskis*. Dostupné z: <https://www.wagnerskis.com/blogs/journal/ski-buyers-guide-part-4-ski-materials>. [cit. 2024-03-16].
- [33] TECHNOLOGIE. Online. In: *Lusti*. Dostupné z: <https://www.lusti.cz/technologie/>. [cit. 2024-03-14].
- [34] SKI BUYER'S GUIDE, PART 2: SKI WIDTH. Online. In: *Wagnerskis*. Dostupné z: <https://www.wagnerskis.com/blogs/journal/ski-buyers-guide-part-2-ski-width>. [cit. 2024-03-16].
- [35] SKI CAMBER VS. ROCKER: A SKIER'S GUIDE. Online. In: *Wagnerskis*. Dostupné z: <https://www.wagnerskis.com/blogs/journal/ski-camber-vs-rocker-skiers-guide>. [cit. 2024-03-16].
- [36] CHENEY, Allie. How to Choose Skis: The Ultimate Buyer's Guide. Online. In: *Sunandski*. Dostupné z: <https://www.sunandski.com/how-to-choose-skis-buyers-guide-ski-size-chart>. [cit. 2024-03-16].
- [37] ISO 5902: Alpine skis — Determination of elastic properties. Online. In: *Alpine skis*. 2nd ed. Geneva: The International Organization for Standardization, 2013, s. 9. Dostupné

z: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/60844/fd31aca10cc04b44852c707932a36556/ISO-5902-2013.pdf>. [cit. 2024-04-07].

[38] ISO 6266: Alpine skis — Determination of fatigue indexes — Cyclic loading test. Online. In: *Alpine skis*. 2nd ed. Geneva: The International Organization for Standardization, 2013, s. 10. Dostupné z: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/60846/3741e0913ec24f5690256e21dd1226b1/ISO-6266-2013.pdf>. [cit. 2024-04-07].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm	milimetr
cm	centimetr
m	metr
m ²	metr čtvereční
m ³	metr krychlový
cm ²	centimetr čtvereční
Nm	Newton metr
bar	jednotka tlaku
Pa	Pascal
MPa	mega Pascal
GPa	giga Pascal
kg	kilogram
g	gram
mg	miligram
°C	stupeň celsia
°	stupeň
α	úhel zkroucení
shore D	metoda měření tvrdosti
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
SiO ₂	Oxid křemičitý
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
CaO	Oxid vápenatý
MgO	Oxid hořečnatý
Na ₂ O	Oxid sodný

K_2O Oxid draselný

B_2O_3 Oxid boritý

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Synergické chování složek kompozitního materiálu [5]	14
Obrázek 2 Porovnání tahového diagramu křehké matrice a kompozitu sestávajícího z této matrice a křehkých keramických vláken [5]	15
Obrázek 3 Šíření trhliny na rozhraní matrice a výztuže při porušování kompozitu [5]	15
Obrázek 4 Rozdíl mezi mikrokompozitem (vlevo) a nanokompozitem (vpravo) s výztuží na bázi destičkových částic jílu [6]	17
Obrázek 5 Schématické rozdělení kompozitních materiálů [7]	18
Obrázek 6 Schéma metody ručního laminování [23]	28
Obrázek 7 Schéma metody vakuové infuze [24]	30
Obrázek 8 Schéma kompresního formování prepregů [27]	31
Obrázek 9 Metoda výroby kompozitu vytvrzováním v autoklávu [21]	32
Obrázek 10 Schéma výroby kompozitu metodou vstřikování pryskyřice [25]	34
Obrázek 11 Schéma pultruzní linky pro reaktoplasty [21]	35
Obrázek 12 Výroba kompozitu pomocí metody navíjení [22]	36
Obrázek 13 Schéma metody zpracování kompozitů RTM [26]	37
Obrázek 14 Schématický průřez prvních lyží ze sklolaminátových kompozitů na světě Rossignol Strato [28]	39
Obrázek 15 Vybrané typy sjezdových lyží [31]	40
Obrázek 16 Schématické složení sjezdové lyže [32]	41
Obrázek 17 Průřez sendvičovou konstrukcí lyže [33]	45
Obrázek 18 Průřez capovou konstrukcí lyže [33]	45
Obrázek 19 Porovnání capové, sendvičové a half-capové konstrukce lyže [36]	46
Obrázek 20 Porovnání technologií camber a rocker, a jejich variací [35]	48
Obrázek 21 Schéma zkoušky průhybu sjezdové lyže v různých místech [37]	50
Obrázek 22 Schéma zkoušky torzní tuhosti sjezdové lyže [37]	50
Obrázek 23 Schématické měření únavy sjezdové lyže za pomoci cyklického ohybového namáhání dle normy ISO 6266 [38]	51
Obrázek 24 Hlavní rozměry vyráběných lyží	56
Obrázek 25 Materiály pro výrobu kompozitních lyží	57
Obrázek 26 Dřevěné jádro z jednosměrné smrkové překližky a ABS hranami	58
Obrázek 27 Sintrovaná skluznice použitá k výrobě lyží	58
Obrázek 28 Ocelové hrany použité pro výrobu lyží	59
Obrázek 29 Biaxiální skelná tkanina použitá pro výrobu lyží	60
Obrázek 30 Triaxiální skelná tkanina použitá jako výztuž pod vázáním	61
Obrázek 31 Transparentní horní fólie (topsheet) použitá pro výrobu lyží	62

Obrázek 32 Výztuže pro špičky a paty z ABS plastu	62
Obrázek 33 Jasanová dýha použitá jako výplň	63
Obrázek 34 Gumové tlumící pásky	64
Obrázek 35 Epoxidová pryskyřice použitá při výrobě lyží	64
Obrázek 36 Schéma uspořádání jednotlivých vrstev v sendvičové konstrukci lyže	65
Obrázek 37 Pořadí jednotlivých vrstev sendvičové konstrukce	65
Obrázek 38 Výkres lyží vytištěný na papír v měřítku 1:1	67
Obrázek 39 Deska s bočním profilem lyže, představující šablonu formy	67
Obrázek 40 Řezání hrubého tvaru přímočarou pilou	68
Obrázek 41 Frézování přesného tvaru pomocí ruční frézky s kopírovacím ložiskem	68
Obrázek 42 Přenesení bočního profilu na ostatní desky pomocí šablony	69
Obrázek 43 Spojení jednotlivých desek formy pomocí lepidla a vrutů a vybroušení nerovností	69
Obrázek 44 Nalepení plechu na povrch formy za použití kontaktního lepidla ve spreji	70
Obrázek 45 Ošetření povrchu formy separační vrstvou	70
Obrázek 46 Výsledná podoba formy pro výrobu lyží	70
Obrázek 47 Kladení vrstev sendvičové konstrukce lyže, roztírání pryskyřice a lepení hran	71
Obrázek 48 Zabalení formy s lyžemi do ochranných vrstev a vakuového pytle	72
Obrázek 49 Autokláv od italské značky Panini použitý k výrobě lyží	73
Obrázek 50 Nastavený program autoklávu pro výrobu lyží	74
Obrázek 51 Čerstvě vyjmuté lyže z formy	75
Obrázek 52 Odřezání přebytečného materiálu přímočarou pilou	76
Obrázek 53 Broušení přebytečného materiálu na stolní brusce a sundání ochranné fólie ..	76
Obrázek 54 Broušení skluznice a hran vyrobených lyží	77
Obrázek 55 Finální podoba vyrobených lyží pomocí technologie zpracování v autoklávu	77
Obrázek 56 Kladení jednotlivých vrstev lyže do formy pro vložení do lisu	78
Obrázek 57 Vyhřívaný lis pro lyže	79
Obrázek 58 Neopracovaná lyže po vyjmutí z lisu	79
Obrázek 59 Finální podoba lyže vyrobené technologií lisování ve vyhřívaném lisu	80
Obrázek 60 Označení vyrobených lyží písmeny A, B, C pro přehlednost	80
Obrázek 61 Stroj na měření pružnosti lyží	82
Obrázek 62 Prohnutá lyže v průběhu měření pružnosti	82
Obrázek 63 Zařízení na měření torzní tuhosti lyží	84
Obrázek 64 Zkroucená lyže během testování torzní tuhosti	85
Obrázek 65 Vady vzniklé na lyžích A a B vyráběných v autoklávu	89

Obrázek 66 Vizuální rozdíl vrchní části lyží způsobený rozdílným uložením skelných tkanin 89

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Přibližné složení E, C, S skelných vláken v hmotnostních procentech [16].....	23
Tabulka 2 Porovnání vlastností aramidových, uhlíkových a skelných vláken [16].....	23
Tabulka 3 Vlastnosti materiálu skluznice.....	59
Tabulka 4 Vybrané vlastnosti ABS plastu použitého pro špičky a paty lyží.....	63
Tabulka 5 Výsledné naměřené hodnoty testování pružnosti vyrobených lyží	83
Tabulka 6 Tabulka udávající konstanty tuhosti pružení c jednotlivých částí lyží	83
Tabulka 7 Výsledné hodnoty zkroucení lyží ve stupních při momentu 20 Nm	85
Tabulka 8 Výsledné hodnoty zkroucení lyží ve stupních při momentu 30 Nm	85
Tabulka 9 Hodnoty torzní tuhosti pro závaží 20 Nm	86
Tabulka 10 Hodnoty torzní tuhosti pro závaží 30 Nm	86

