

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

Sportovní aplikace kompozitních materiálů s různými typy matic a výztuží

Bakalářská práce

2020

Lucie Smetanová

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lucie Smetanová**
Osobní číslo: **C17056**
Studijní program: **B2829 Anorganické a polymerní materiály**
Studijní obor: **Polymerní materiály a kompozity**
Téma práce: **Sportovní aplikace kompozitních materiálů s různými typy matic a výztuží**
Zadávající katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární přehled různých typů polymerních matic využívaných pro sportovní aplikace. Popište jejich výhody, nevýhody a důležité vlastnosti s přihlédnutím k jejich aplikaci.
2. V druhé části se zaměřte na popis používaných typů výztuže, jak z hlediska materiálového, tak z hlediska geometrie i uspořádání výztuže.
3. Dále se zabývejte přehledem různých technologií výroby a zpracování kompozitních materiálů používaných pro výrobu sportovního náčiní.
4. V poslední části literární rešerše se zaměřte na přehledný výčet sportovních aktivit, při kterých se hojně využívají kompozitní materiály na bázi polymerů s konkrétními příklady.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Prokůpek, Dr.**
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Datum zadání bakalářské práce: **20. prosince 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **4. července 2020**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2020

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 2. 7. 2020

Lucie Smetanová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Luboši Prokúpkovi, Dr. za ochotu, trpělivost a cenné rady, které mi poskytl. Zvláště mu vděčím za podporu a pomoc při volbě tématu, které mi je blízké. Chtěla bych poděkovat Mgr. Tomáši Macasovi, PhD. za konzultace sportovní oblasti mé práce a podporu ve sportu. Děkuji blízkým přátelům za psychickou podporu. Zvláštní poděkování patří mé rodině, která mě ve studiu podporuje a moc si toho vážím. Děkuji.

ANOTACE

Tato teoretická bakalářská práce se zabývá polymerními matricemi a výztužemi používanými ve sportovních aplikacích. Popisuje jejich vlastnosti, výhody, nevýhody a použití v konkrétních sportovních aplikacích. Další část práce je zaměřená na vybrané technologie zpracování používané při výrobě sportovního náčiní. Poslední část literární rešerše obsahuje přehledný výčet sportovních aktivit, při kterých se hojně využívají kompozitní materiály.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozit, polymerní matrice, epoxidové pryskyřice, vláknové výztuže, sportovní aplikace

TITLE

Sport applications of composite materials with various types of matrices and reinforcements

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with polymer matrices and reinforcements used in sport applications. It describes their properties, advantages, disadvantages and use in specific sport applications. Next part of this thesis is focused on selected manufacturing technologies used in production of sport equipment. The last part of this literary research contains a list of sport activities in which composite materials are used in abundance.

KEYWORDS

Composite, polymer matrix, epoxy resin, fiber reinforcement, sport applications

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	11
1. ÚVOD.....	12
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	13
2.1. Kompozitní materiál.....	13
2.1.1. Příklady z historie	13
2.1.2. Definice kompozitů.....	14
2.1.3. Vlastnosti kompozitů	14
2.2. Polymerní matrice	16
2.2.1. Termoplastické matrice.....	17
2.2.2. Reaktoplastické matrice	19
2.2.2.1. Nenasycené polyesterové pryskyřice	21
2.2.2.2. Epoxidové pryskyřice	23
2.2.2.3. Vinylesterové pryskyřice.....	25
2.3. Výztuže	26
2.3.1. Částicové výztuže	27
2.3.2. Vlákenné výztuže	27
2.3.2.1. Skleněná vlákna	29
2.3.2.2. Uhlíková vlákna.....	31
2.3.2.3. Aramidová vlákna	32
2.3.2.4. Borová vlákna.....	34
2.3.3. Geometrické uspořádání vláknových výztuží.....	35
2.3.3.1. Jednovrstvé kompozity	35
2.3.3.2. Vícevrstvé kompozity.....	40
2.4. Technologie výroby	43
2.4.1. Ruční kladení	43
2.4.2. Navíjení.....	44
2.4.3. Pultruze (tažení).....	46
2.4.4. Lisování	47
2.4.4.1. Lisování pomocí vakua.....	47
2.4.4.2. Lisování v autoklávu	49
2.4.5. Injektážní a infuzní technologie.....	49
2.4.5.1. Vysokotlaké vstřikování	49

2.4.5.2.	Vakuo-injekční technologie.....	51
2.4.5.3.	Vakuové prosvětlování	51
2.5.	Sportovní aplikace kompozitních materiálů.....	53
2.5.1.	Cyklistika.....	53
2.5.2.	Lyžování	55
2.5.3.	Veslování	57
2.5.4.	Další sportovní vybavení	60
3.	ZÁVĚR.....	65
4.	LITERATURA	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Struktura damascénské oceli [3].....	13
Obrázek 2: Schéma struktury termoplastu [11].....	17
Obrázek 3: Schéma struktury zesíťovaného reaktoplastu [11]	19
Obrázek 4: Strukturní vzorce sloučenin:	21
Obrázek 5: Schéma rovnice vytvrzování nenasycené polyesterové pryskyřice [9]	22
Obrázek 6: Schéma rovnice vzniku diandiglycidyletheru [15].....	24
Obrázek 7: Dělení kompozitů podle geometrie výztuže	26
Obrázek 8: Uspořádání vláknové výztuže v kompozitech [1]	28
Obrázek 9: Uhlíkové vlákno HM [18]	29
Obrázek 10: Struktura skleněného vlákna [9]	30
Obrázek 11: Schéma výroby skleněných vláken [9].....	31
Obrázek 12: Schéma výroby uhlíkových vláken pyrolýzou PAN [10].....	32
Obrázek 13: Struktura aromatického polyamidu [9].....	33
Obrázek 14: Schéma výroby aramidových vláken [9]	34
Obrázek 15: 3D výztuž příruby [9]	35
Obrázek 16: Skleněné rovingy [9]	36
Obrázek 17: Druhy vazeb tkanin [9]	37
Obrázek 18: Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku [9]	37
Obrázek 19: Jednosměrná uhlíková vlákna [18]	38
Obrázek 20: a – karbonová tkanina, b – skleněná tkanina, c – kevlarová tkanina [18].....	39
Obrázek 21: Rohož z kontinuálních vláken [10].....	39
Obrázek 22: Šitá netkaná textilie [5].....	40
Obrázek 23: Schéma sendvičové struktury s voštinou [21]	41
Obrázek 24: Nomexová voština [18]	42
Obrázek 25: Ruční kladení [5]	43
Obrázek 26: Navíjení [23].....	45
Obrázek 27: Pultruze [22]	46
Obrázek 28: Lisování za tepla a tlaku [5]	47
Obrázek 29: Lisování pomocí vakua [5]	48
Obrázek 30: Vysokotlaké vstřikování (RTM) [5]	50
Obrázek 31: Vakuové prosycování [26].....	51
Obrázek 32: Silniční kolo s monokokovou konstrukcí rámu [30]	54

Obrázek 33: Konstrukce lepených trubek [31]	55
Obrázek 34: Konstrukce s použitím rámových spojek [33]	55
Obrázek 35: Sjezdové lyže s dřevěným jádrem vyztužené uhlíkovými vlákny [40]	56
Obrázek 36: Konstrukce lyží: a – sendvičová konstrukce, b – PUR konstrukce, c – konstrukce CAP [38]	57
Obrázek 37: Závodní skif vyztužený uhlíkovými vlákny [18]	58
Obrázek 38: Konstrukce lodi vyrobené prepregovou technologií [18]	59
Obrázek 39: Pačiny vesel vyztužené uhlíkovými vlákny s aramidovými pásky [44]	59
Obrázek 40: Rybářský prut vyztužený uhlíkovými vlákny [45]	60
Obrázek 41: Windsurfové prkno [46]	61
Obrázek 42: Snowboard vyztužený uhlíkovými vlákny [47]	61
Obrázek 43: Kompozitní hokejka vyztužená uhlíkovými vlákny [47]	62
Obrázek 44: Český dvojbob na trati v Soči [34]	62
Obrázek 45: Kompozitní tenisová raketa [48]	63
Obrázek 46: Šlachovka vyztužená karbonovými vlákny [51]	64

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PC	Polykarbonát
PA	Polyamid
PPS	Polyfenylensulfid
PBTP	Polybutylentereftalát
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
G	Glass
C	Carbon
A	Aramid
PAN	Polyakrylonitril
LM	Low modulus
MM	Medium modulus
HM	High modulus
UHM	Ultrahigh modulus
HT	Vlákna s vysokou pevností
HM	Vlákna s vysokou tuhostí
SMC	Sheet moulding compounds
DMC	Dough moulding compounds
BMC	Bulk moulding compounds
RTM	Resin transfer moulding
VARTM	Vacuum assisted resin transfer moulding
VIP	Vacuum infusion process
SCRIMP	Seemann composites resin infusion moulding process
PUR	Polyuretan

1. ÚVOD

Lidé již od nepaměti projevovali snahu získat co nejlepší materiály. Využití těchto materiálů značně ovlivnilo historii, a to dokonce natolik, že některá období byla dle daných materiálů pojmenována. S objevem nových materiálů postupně vznikal svět, který nás dnes obklopuje. Obrovským zlomem se stal vývoj kompozitních materiálů, které najdeme v podstatě všude. Staly se součástí každodenního života, a ty nejšpičkovější jsou nepostradatelným základem leteckého průmyslu a vesmírných projektů.

Žijeme v době, kdy je sport čím dál populárnější a lidé mu věnují stále více času a pozornosti. Důkazem tohoto faktu mohou být například přeplněné sjezdovky v lyžařských střediscích, rušné cyklostezky a stále rostoucí počet účastníků cyklistických závodů. Tento zájem je spojen také s poptávkou po kvalitnějším, a především lehčím sportovním náčiní a tyto podmínky kompozitní materiály skvěle splňují. Dnes jsou ve sportu natolik rozšířené a dostupné, že je vidáme nejen u výkonnostních, ale i u hobby sportovců. Doba dřevěných lyží, veslic, hokejek a těžkých ocelových rámců kol je, až na výjimku sběratelských kusů, dávno pryč.

Vývoj materiálů v oblasti sportu je poháněn vrcholovým sportem. Touha po tom nejlepším materiálu pro danou aplikaci, podpořená téměř neomezenými finančními prostředky, umožňuje inženýrům obrovské inovace. Stáváme se svědky technické dokonalosti, kdy nejlepší cyklisté světa na Tour de France jezdí na strojích, jejichž výroba je srovnatelná s výrobou raketoplánů. Jejich prototypy jsou testovány v aerodynamických tunelech, veškerá data jsou přísně chráněna a jakákoliv inovace je ihned patentována.

Cílem této práce je vypracovat literární rešerši na téma aplikace kompozitních materiálů ve sportu, a to především těch nejčastěji používaných. Vytvořit přehled různých typů polymerních matric, výztuží a technologií výrob se zaměřením se na jejich vlastnosti, výhody a nevýhody při konkrétních aplikacích. Kvůli již už tak širokému zaměření nebude práce zahrnovat motosport a hlavními tématy budou aplikace kompozitních materiálů v jízdách kolech, lyžích a sportovních lodích.

2. TEORETICKÁ ČÁST

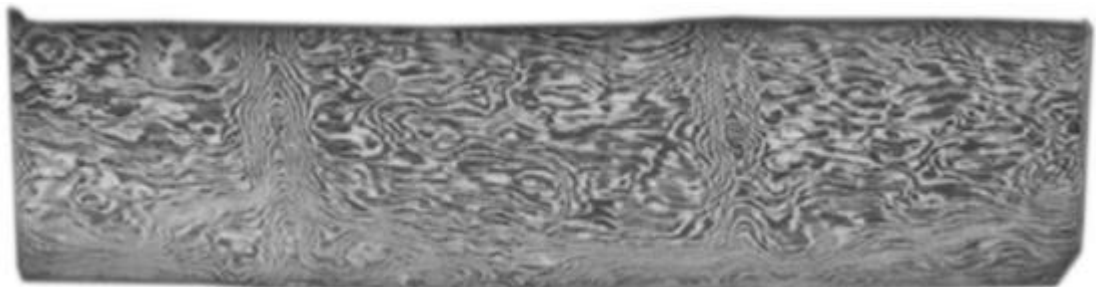
2.1. Kompozitní materiál

Kompozitní materiály (krátce kompozity) jsou materiály se speciálními vlastnostmi, v nichž se uplatňuje synergický efekt. Jedná se o kombinaci dvou nebo více materiálů s rozdílnými vlastnostmi. Synergický efekt znamená, že výsledné vlastnosti kompozitu jsou výrazně lepší, než odpovídá pouhému součtu vlastností jednotlivých složek. Vývojem a technologií těchto moderních technických materiálů se zabývá materiálové inženýrství. [1; 2]

2.1.1. Příklady z historie

První zmínku o kompozitech najdeme v bibli. Jedná se o bloky ze sušené hlíny plněné slámou používané jako hlavní stavební materiál Židů. Spory s faraonem o dodávku slámy do kompozitních bloků byly jedním z důvodů exodu Židů z Egypta. [2]

Dalším příkladem je damascénská ocel, složená ze střídajících se plátků středně uhlíkové (pod 0,5 % C) a vysokouhlíkové (okolo 2 % C) oceli, jejíž strukturu můžeme vidět na obrázku 1. Je skvělým příkladem kompozitu s optimální kombinací tvrdosti a houževnatosti, které jsou pro výrobu mečů a dýk nutností. Nebyla vyráběna v Damašku, jak by mohl její název napovídat, ale v Indii. Naneštěstí umění výroby damascénské oceli je dnes ztraceným uměním a vznik posledních kvalitních čepelí se odhaduje okolo roku 1750. [2; 3]



Obrázek 1: Struktura damascénské oceli [3]

Mezi historické kompozity se řadí i materiál mongolských luků – vrstvený kompozit. Dřevěné střední vrstvy dávají luku tvar, rohovinové vnější vrstvy odolávají tlaku a vnitřní vrstvy jsou z kravských šlach a odolávají tahu. Takovéto uspořádání luku umožňuje nerovnoměrné ohybové deformace a výsledkem je vynikající dostřel. [2; 4]

2.1.2. Definice kompozitů

Kompozity jsou heterogenní materiály složené ze dvou či více složek, lišících se chemickým složením, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Na rozdíl od slitin, které jsou také heterogenními materiály, se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek a tyto složky si ponechávají své charakteristiky. Cílem je uplatnění předností jednotlivých složek a získání materiálu s takovými vlastnostmi, kterých by nebylo možné dosáhnout pouhou sumací (synergický efekt). Výsledné vlastnosti kompozitu jsou tedy ovlivněny jak jednotlivými fázemi, tak vzájemnou interakcí jejich povrchů. [1;2]

Obecně uznávaná definice kompozitního materiálu neexistuje a vznikají tak sporné body, ve kterých se jednotlivé a méně obecné definice liší. Například není dáno, zda musí být všechny složky v kompozitu pevné fáze či je možné započítat i pěnové materiály. Jedná-li se pouze o uměle vytvořené látky, nebo je možné započítat i látky přírodní. Typickým přírodním kompozitním materiálem je dřevo. Skládá se z vláken celulózy v ligninové matici. [1;5]

- Definice užívaná v Anglii, pocházející z knihy *Theory of Composites* G. F. Miliona: [2; 6]

„Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších, než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (statisticky) homogenní.“

- Definice používaná v USA, *Composite Materials Handbook*: [2; 7]

„Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.“

2.1.3. Vlastnosti kompozitů

Kompozit se skládá ze dvou fází – spojitě a nespojitě. Spojitá (kontinuální) fáze, zvaná matrice, obsahuje fázi nespojitou (diskontinuální), která plní úkol výztuže a je nejčastěji tvořena vlákny nebo částicemi. Výsledné vlastnosti materiálu jsou určeny vlastnostmi těchto složek,

jejich rozložením a chemickou či fyzikální interakcí. Podmínkou pro zařazení vícefázových materiálů mezi kompozity je jejich příprava míšením matrice a výztuže s minimálním podílem výztuže 5 %. [1;2]

Velmi důležitou vlastností kompozitu je jeho nehomogenita, a to v měřítku větším než v atomárním. Nehomogenity musí být ale přitom dostatečně malé, aby v makroměřítku bylo možné považovat tento kompozit za homogenní materiál. Konstrukční díly tedy musí být homogenní. Problém může nastat v případě některých struktur, kdy je počet nehomogenit příliš malý a není možné tento materiál považovat za přirozeně homogenní v makroměřítku. Mluví se o nich jako o kompozitních strukturách. Typickým příkladem mohou být několikvrstevné struktury či armovaný beton. [2]

Typickou vlastností kompozitních materiálů je anizotropie. Zatímco klasické technické materiály jsou zcela izotropní, což znamená, že mají ve všech směrech stejné vlastnosti, u kompozitů je potřeba počítat s lišícími se vlastnostmi v různých směrech. Pevnost kompozitu s polymerní matricí vyztuženou skleněnými vlákny se ve směru vláken a kolmo na ně může lišit až o několik řádů. Existují dokonce i speciální případy, kdy je možné anizotropii řídit, a to například pomocí magnetického pole. Jedná se o takzvané „chytré kompozity s řízenou anizotropií“. Tato nová generace magnetických elastomerů je tvořena magnetickými nanočásticemi rozptýlenými ve vysoce elastické matrici a dosahuje nových vlastností. Všechny síly působící na částice se přenášejí na polymerní řetězce a dochází k okamžité deformaci. Kompozity s anizotropií vyrobenou na míru poskytují nové možnosti pro jejich využití. [2; 8]

2.2. Polymerní matrice

Matrice je spojitou (kontinuální) fází v kompozitu a plní řadu funkcí. Určuje tvar kompozitu, chrání vlákna před mechanickým poškozením a vnějšími vlivy a zajišťuje jejich stálou geometrickou polohu. V porovnání s výztuží má menší pevnostní vlastnosti a větší plasticitu. Kvalita kompozitu je určena mírou adheze na fázovém rozhraní matrice – výztuž. Pro dosažení žádoucích vlastností je potřeba, aby matrice smočila vlákno zcela a bez bublin, čehož je možné dosáhnout vhodnou viskozitou a povrchovým napětím matrice. Velmi často není homogenní, ale obsahuje různá inertní plniva či aditiva pro dosažení lepších vlastností. Například pro zlepšení fyzikální či chemické vazby se může na plnivo nanést apretace vhodná pro určitý typ matrice. Nejrozšířenější jsou matrice polymerní, ale existují i matrice z anorganických materiálů, jako jsou uhlík, kov či keramika. Použití těchto alternativních materiálů je především díky jejich vyšší tepelné odolnosti a následném uplatnění v materiálech vystavených vyšším provozním teplotám. Polymerní matrice v porovnání s kovy mají řadu nenahraditelných a ceněných vlastností, mezi které patří například odolnost proti korozi, nízká měrná hmotnost a nevyžadují povrchové úpravy. [1; 9; 10]

Polymerní matrice se dělí do dvou skupin na reaktoplasty (termosety) a termoplasty. Zvláštní podskupinou jsou elastomery, jejichž typickou vlastností je jejich vlastní tažnost a modul pružnosti v tahu E je oproti jiným polymerním matricím velmi nízký. Pohybuje se v rozmezí 0,002 – 0,2 GPa, zatímco u termoplastů se tyto hodnoty pohybují v rozmezí 1,5 – 3 GPa a u reaktoplastů 2,5 - 4,5 GPa. Původně se pro kompozity používaly pouze vyztužené nenasycené polyesterové nebo epoxidové pryskyřice. Dnes jsou při výrobě kompozitů nejčastěji používanou skupinou reaktoplastů nejrůznější reaktivní pryskyřice. Stále vyšší podíl na trhu však zaujímají v dnešní době termoplasty vyztužené krátkými vlákny o délce kolem 0,2 mm. Reaktoplasty ve formě taveniny mají nižší viskozitu, než je viskozita taveniny termoplastů, která je oproti reaktoplastům sto – až tisícinásobná. Z tohoto důvodu reaktoplasty ve srovnání s termoplasty snadněji smáčejí a prosycují vlákna, a proto je jejich zpracování jednodušší a energeticky méně náročné. Termoplasty jsou zpracovávány při vyšších teplotách, kdy jsou maximální hodnoty teplot při zpracování ovlivněny teplotou rozkladu. Vzhledem k vysoké viskozitě tavenin termoplastů je proces složitější. Pro urychlení prosycování je zapotřebí využití vnějších sil a samotný proces neprobíhá přímo u výrobce, ale v samostatném výrobním postupu. Výhodou zpracování termoplastů je však především krátká doba a jednoduchost procesu. Termoplasty jsou roztaveny, vytvarovány a po ochlazení mají stálý tvar, a to někdy

i během několika vteřin. Navíc jsou díky molekulární struktuře při správném zpracování chemicky inertní. V opačném extrému může proces síťování reaktoplastů trvat i několik dní. Zesíťováním reaktivních pryskyřic dojde k jejich vytvrzení, a to za přítomnosti urychlovače a katalyzátoru, případně dodáním energie – tepla nebo záření. Zpracování reaktoplastů má horší dopad na životní prostředí a nese s sebou vyšší zdravotní rizika. [1; 5; 9; 10]

Výběr vhodného materiálu pro matrici je tedy řízen mnoha aspekty, jako jsou například mechanické a tepelné vlastnosti, cena, dobrá zpracovatelnost, dopad na životní prostředí a zdravotní rizika. Práce materiálového inženýra vyžaduje hluboké znalosti o materiálech. Byla by chyba, kdyby předpokládal, že všechny levné kompozity budou polyesterové matrice vyztužené skleněnými vlákny a drahé kompozity vysokojakostní matrice vyztužené karbonovými či borovými vlákny. Jeho úkolem je na základě svých znalostí vybrat nejvhodnější materiál či jejich kombinaci pro danou aplikaci, výrobek a zákazníka. A stejně tak tomu je i u sportovních aplikací kompozitních materiálů. [5; 10]

2.2.1. Termoplastické matrice

Termoplasty jsou skupinou plastů s nejjednodušší molekulární strukturou a s chemicky nezávislými makromolekulami, jak je znázorněno na obrázku 2. Zahřátím dojde k jejich roztavení a po ochlazení se vrátí do původního stavu, aniž by došlo ke změně struktury. Lze opakovat více cyklů zahřívání a chlazení bez vážného poškození, a proto umožňují přepracování a recyklaci. [11; 12]



Obrázek 2: Schéma struktury termoplastu [11]

Výhody termoplastů: [11]

- Měknutí a tavení zahříváním umožňuje svařování a tvarování za tepla.
- Krátká doba cyklu zpracování díky absenci chemické reakce při síťování.
- Snazší kontrola zpracování, jelikož se jedná pouze o fyzikální přeměnu.

- Pokud jsou před zpracováním správně usušeny, neuvolňují plyny ani vodní páru.
- Odpady jsou částečně opět využitelné jako výchozí surovina díky reverzibilitě fyzikálního změkčení nebo tání.

Nevýhody termoplastů: [11]

- Kvůli absenci chemických vazeb mezi makromolekulami se stoupající teplotou klesá modul pružnosti E.
- Ze stejného důvodu nejsou viskoelastické vlastnosti (creep a relaxace napětí) tak dobré jako u reaktoplastů.
- Při hoření dochází k odkapávání materiálu a k destrukci zbytkové fyzikální soudržnosti.

Termoplastické polymerní matrice jsou při doručení od dodavatele obvykle plně polymerizované. To znamená, že všechny chemické reakce byly dokončeny a uživatel již řeší pouze změny fyzikální struktury – tání a tavení. Existují i výjimky tohoto pravidla. Uživatel může použít předpolymer s nízkou molekulovou hmotností. Výhodou je nízká viskozita a snadné sycení vláken kompozitu. Po dokončení sycení vláken proběhne finální polymerace a viskozita rapidně vzroste. Jednou z hlavních vlastností amorfních termoplastů je rozpustnost v běžných průmyslových rozpouštědlech. To znamená, že je možné naimpregnovat vlákna výztuže rozpouštědlem s nízkou viskozitou a vyhnout se tak problému s vysokou viskozitou taveniny matrice během zpracování. Zároveň to znamená, že vzniklý kompozit není rozpouštědlům odolný. [5; 10]

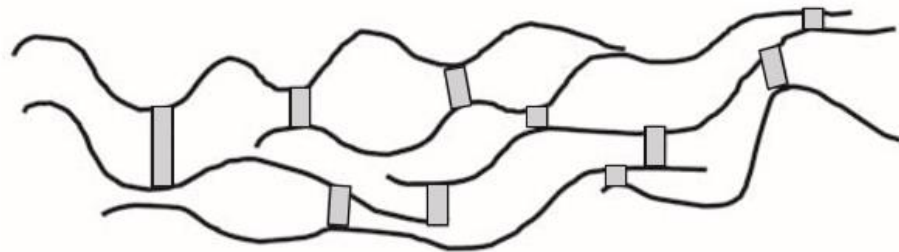
Vynález a využití termoplastických polymerních matric začal mnohem později, než tomu bylo u matric na bázi reaktoplastů, avšak jejich vývoj v dnešní době je mnohem rychlejší. Kromě již dříve zmíněných výhod existuje mnoho aspektů pro jejich výzkum a aplikace. Termoplasty mají obecně neomezenou trvanlivost, nízkou absorpci vlhkosti, vynikající tepelnou stabilitu, vysokou houževnatost a odolnost vůči poškození, krátké a jednoduché zpracovatelské cykly a potenciál pro významné snížení výrobních nákladů. Kromě toho mají schopnost být přetavovány a přepracovány a také existuje relativně snadný způsob oprav poškozených kompozitů. [11; 12]

Typickými příklady termoplastů užívaných jako polymerní matrice jsou polyethylen (PE), polypropylen (PP), polykarbonáty (PC), polyamidy (PA), polyfenylsulfid (PPS), polybutylentereftalát (PBTP), polyetheretherketon (PEEK), polyetherimid (PEI) a mnoho dalších. Jejich využití záleží na požadovaných vlastnostech konkrétní matrice. Nachází

uplatnění při běžných aplikacích jako například ve stavebnictví, v domácnostech, v automobilovém průmyslu, ale i v medicíně, leteckém průmyslu, a dokonce v kosmickém výzkumu. [5; 11; 12]

2.2.2. Reaktoplastické matrice

Reaktoplasty jsou skupinou plastů, ve kterých probíhá ireverzibilní změna chemické struktury. Tento proces se nazývá vytvrzování a dochází při něm k síťování makromolekul, které vytvoří 3D strukturu, jak je možné vidět na obrázku 3. Jakmile jednou dojde k vytvrzení, není možné polymer přetvarovat jeho zahřátím, jako tomu bylo u termoplastů. [11]



Obrázek 3: Schéma struktury zesíťovaného reaktoplastu [11]

Vazby mezi polymerními řetězci omezují schopnost jejich pohybu a rozmístění, což má za následek různé výhody i nevýhody.

Výhody reaktoplastů: [11]

- Při degradaci polymeru, až na výjimky, nevzniká kapalná fáze a nedochází tak k odkapávání, což zlepšuje některé aspekty chování při požáru. Zbytková fyzikální soudržnost materiálu navíc poskytuje bariérový efekt.
- Díky přítomnosti chemických vazeb mezi makromolekulami se stoupající teplotou roste modul pružnosti E.
- Ze stejného důvodu dosahují lepších viskoelastických vlastností (creep a relaxace napětí), než u termoplastů.
- Jednodušší proces zpracování v kapalně fázi.

Nevýhody reaktoplastů: [11]

- Dlouhá doba vytvrzování prodlužuje celkovou dobu výrobních cyklů. Proces většinou vyžaduje zahřívání, což výrazně zvyšuje výrobní náklady.
- Samotné zpracování je velmi náročné na řízení, protože je potřeba dosáhnout přesné rovnováhy mezi rychlostí síťování a tvarováním.
- Některé polymery uvolňují během vytvrzování plyny – nejčastěji vodní páru.
- Odpad nelze recyklovat kvůli ireverzibilitě vytvrzovací reakce. V nejlepším případě je možné odpad rozdrtit a využít jako plnivo.

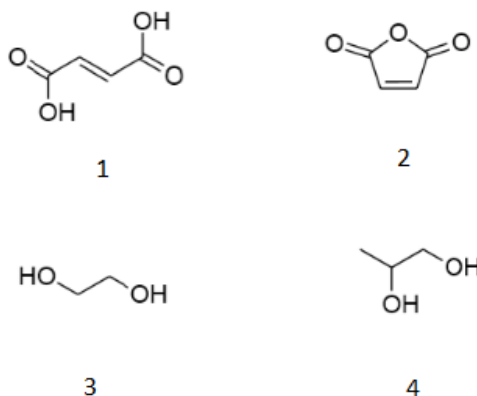
Syntetické pryskyřice používané v kompozitních materiálech musí mít dobré mechanické vlastnosti, dielektrické vlastnosti, tepelnou odolnost a odolnost proti stárnutí. Také je vhodná snadná zpracovatelnost. Původně se používaly pouze nenasyčené polyesterové a epoxidové pryskyřice, které jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a většinou při normální teplotě v tekutém stavu. Vytvrzování pryskyřic probíhá za přítomnosti katalyzátoru, urychlovače či dodáním energie ve formě tepla nebo záření. Vytvrzením získá kompozit své finální vlastnosti. Dosahuje vysokých hodnot pevnosti a tuhosti, ale na rozdíl od termoplastů jsou reaktoplastické pryskyřice často křehké. Dosažení větší houževnatosti se řeší přidávkem modifikačních přísad. I ve formě taveniny mají většinou nízkou hodnotu viskozity, což umožňuje snadné prosycování vláken kompozitu. Například viskozita tavenin fenolických a epoxidových pryskyřic při zpracování je poměrně vysoká, a tak je potřeba použít rozpouštědla. Běžně používanými rozpouštědly jsou aceton, alkohol, toluen a benzen a používají se v množství 10–60 hmotnostních % pryskyřice. Rozpouštědla se dělí do dvou skupin na reaktivní a nereaktivní podle toho, zda se účastní vytvrzovací reakce pryskyřice. [5; 9; 13]

První syntetický kompozit vznikl v roce 1872 kysele katalyzovanou kondenzací fenolu s formaldehydem za zvýšené teploty a tlaku, vytvrzovaný spolu s plnivem. Nazývá se Bakelit podle belgického – amerického chemika, Lea Henricuse Arthura Baekelanda, který prokázal vliv tlaku a plniv a odstartoval tak od roku 1910 průmyslovou výrobu Bakelitu. Typickými příklady reaktoplastických pryskyřic jsou epoxidové, nenasyčené polyesterové a vinylesterové pryskyřice, které mimo jiné slouží právě jako matrice využívané pro sportovní aplikace. Mezi další příklady je možno uvést melaminformaldehydové pryskyřice a různé druhy matric pro speciální aplikace, jako je například diallylftalátová pryskyřice. [13; 14]

2.2.2.1. Nenasycené polyesterové pryskyřice

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou stěžejním materiálem reaktoplastických matric, a to díky zajímavé kombinaci nízké ceny, dobrých vlastností a jednoduchosti zpracování. Jsou známy od roku 1936 a přes 70 % veškeré výroby se uplatňuje v kompozitech. Jedná se o bezbarvé až slabě nažloutlé roztoky lineárních nenasycených polyesterů v monomerech, které jsou schopny polymerace. Při vytvrzování dochází k zesíťování kopolymerací nenasyceného polyesteru s nenasyceným monomerem. [9; 10; 15]

Nenasycené polyestery se připravují polyesterifikací nenasycených dikarboxylových kyselin s dioly. Nejčastěji používanými nenasycenými dikarboxylovými kyselinami jsou kyselina fumarová a maleinanhydrid a dioly propylenglykol a ethylenglykol. Jejich strukturální vzorce jsou znázorněny na obrázku 4. Čisté glykolmaleinátové polyestery se z důvodu jejich velké reaktivity, obtížné přípravy a nevyhovujících vlastností nepoužívají. Připravují se směsi obsahující nasycenou dikarboxylovou kyselinu. Molární poměr nenasycené a modifikující dikarboxylové kyseliny se pohybuje v rozmezí 0,3 - 2 a závisí na tom, k jakému účelu má pryskyřice sloužit. [15]

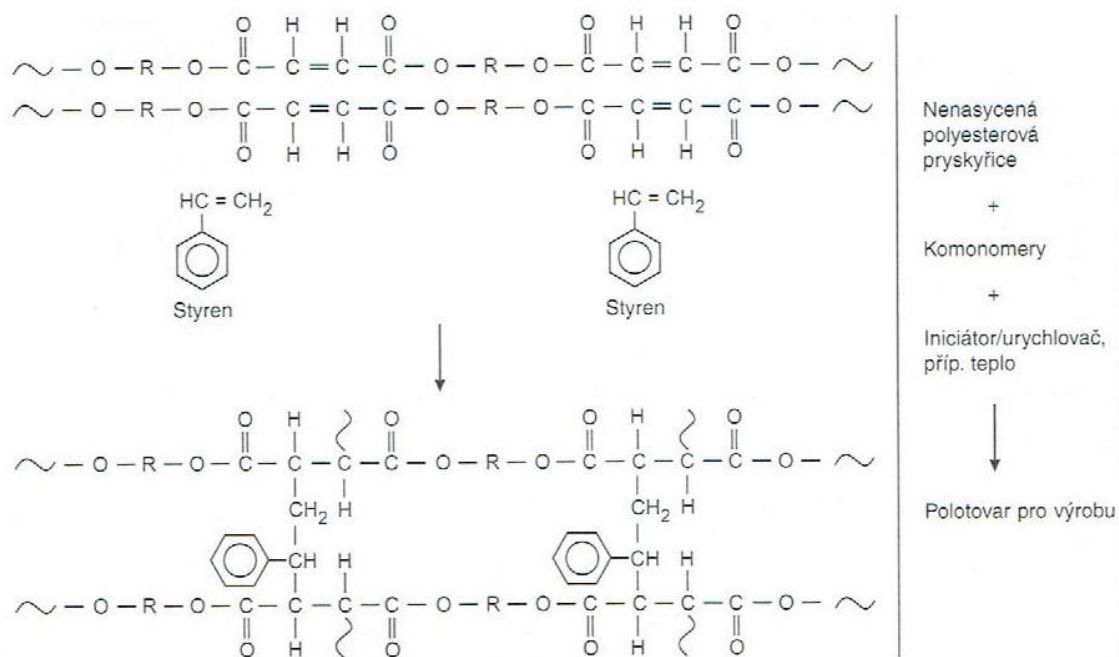


Obrázek 4: Strukturální vzorce sloučenin:
1 - kyselina fumarová, 2 - maleinanhydrid, 3 - ethylenglykol, 4 – propylenglykol

Druh a množství nenasycené karboxylové a modifikující pryskyřice, polyalkoholu, síťujícího monomeru, inhibitoru a způsob a podmínky vytvrzování spolu s dalšími faktory ovlivňují aplikační vlastnosti nenasycených polyesterových pryskyřic. Jako monomerní reaktivní rozpouštědlo se téměř výhradně používá styren, který kromě ekonomických důvodů splňuje i řadu předpokladů pro výběr vhodného rozpouštědla. Mezi tyto předpoklady se řadí

nízká těkavost, dobrá rozpouštěcí schopnost a musí dobře kopolymerovat s polyesterem. Velký důraz je kladen i na hodnocení zdravotních rizik. Dalšími používanými rozpouštědly jsou také vinyltoluen a chlorstyren. [10; 15]

Vytvrzování probíhá radikálovou kopolymerací dvojných vazeb nenasyceného polyesteru s dvojnými vazbami reaktivního monomeru. Schéma rovnice vytvrzování je znázorněno na obrázku 5. Zdrojem radikálů jsou organické peroxidy. Radikál otevře dvojnou vazbu a ta může nadále reagovat. Rychlost vzniku radikálů je ovlivněna teplem, případně urychlovačem. Celková rychlost reakce může být ovlivněna přidavkem katalyzátoru. Prodloužení doby zpracovatelnosti je možné řídit pomocí inhibitorů, které pohlcují vzniklé radikály. Proto je možné stejný druh pryskyřice vytvrzovat několik minut, ale i několik dní. [9; 15]



Obrázek 5: Schéma rovnice vytvrzování nenasycené polyesterové pryskyřice [9]

Charakteristickou výhodou kombinace nenasyceného polyesteru s kapalným monomerem je dobré zpracování, protože vzniklý roztok je kapalný a umožňuje snadnou manipulaci. Vytvrzování v přítomnosti iniciátorů probíhá snadno a výsledné vlastnosti vytvrzených produktů jsou velmi dobré. Zpracování probíhá za atmosférického tlaku, což je v porovnání s fenolickými a epoxidovými pryskyřicemi značnou výhodou. Cena je daleko nižší než u epoxidových pryskyřic. Nevýhodou při zpracování je poměrně velké objemové smrštění

(o 5–12 %), špatná teplotní odolnost a nízká tolerance UV záření, které se dá relativně dobře řešit přidávkem různých aditiv tak, že nekomplikují využití těchto pryskyřic ve většině aplikací. Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou jen výjimečně používány jako matrice vyztužené uhlíkovými vlákny, ale skleněná vlákna jsou pro ně typická. Celosvětově tvoří přes 80 % všech pryskyřic používaných v kombinaci se skleněnými vlákny. Často jsou označovány jako skelné lamináty, což může být matoucí, protože správně se jedná o označení pouze vrstevnatých materiálů. [9; 10; 13; 15]

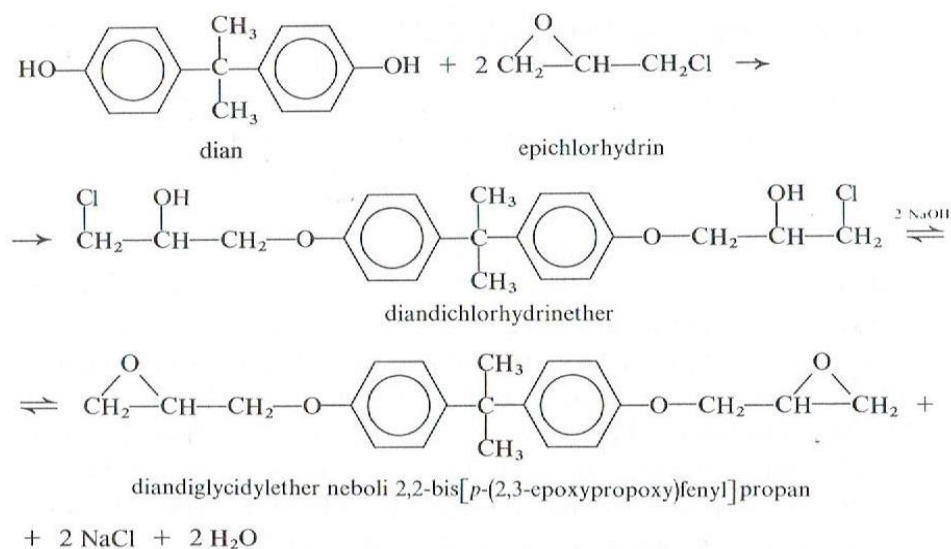
Jak již bylo zmíněno, výsledné vlastnosti závisí na volbě výchozích materiálů a existuje mnoho typů pryskyřic. Například kyselina ortoftalová zvyšuje chemickou odolnost a usnadňuje zpracování, kombinací kyselin tereftalové a izoftalové je tvořen základ pro velmi kvalitní kompozity odolné proti hydrolýze a kyselina tetrahydroftalová zvyšuje houževnatost a tepelnou odolnost. Významnou a levnou surovinou je dicyklopentadien, který v kombinaci s nenasycenými kyselinami a glykoly tvoří důležitou složku pro stavbu lodí. Využívá se pro průrazu vzdorné povrchy. [9]

2.2.2.2. Epoxidové pryskyřice

Syntéza epoxidových pryskyřic začala okolo roku 1930 a jejich průmyslová výroba se rozvinula během následujících deseti let. Epoxidové pryskyřice patří do skupiny velmi hodnotných termosetů s řadou ceněných vlastností, jako jsou vynikající mechanické vlastnosti, přilnavost k podkladu, vysoká rozměrová stálost, skvělé dielektrické vlastnosti a odolnost proti korozi. Velmi ceněnou vlastností je jejich značná odolnost proti vodě, některým rozpouštědlům a roztokům kyselin a alkálií. Těmto vlastnostem odpovídá i vysoká cena. Epoxidové pryskyřice mají největší uplatnění v oblasti lepidel, zalévacích a nátěrových hmot. Pro kompozitní materiály je využito pouze 8 % z celkového objemu výroby a mají uplatnění zejména v kombinaci s uhlíkovými a borovými vlákny. [9; 13]

Epoxidové pryskyřice jsou sloučeniny obsahující v molekule více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu a za normální teploty jsou v kapalném nebo tuhém stavu. Díky velké reaktivitě epoxidových skupin reagují s velkým počtem látek. Hlavní výhodou je, že při vytvrzování nedochází k odštěpování vedlejších produktů a míra smrštění je menší, než u nenasycených polyesterových pryskyřic (okolo 2–5 %). Nejběžnější jsou pryskyřice glycidylového typu obsahující glycidylové skupiny (glycidyl = 2,3-epoxypropyl) připravené reakcí epichlorhydrinu s bisfenoly, nejčastěji s bisfenolem A. Alkalickou kondenzací dochází

k adici epichlorhydrinu na fenolický hydroxyl za vzniku dichlorhydrinetheru a následným odštěpením chlorovodíku dojde ke vzniku epoxidových skupin (obrázek 6). [9; 14; 15]



Obrázek 6: Schéma rovnice vzniku diandiglycidyletheru [15]

Vytvrzování lze uskutečnit více způsoby. Největší význam má však vytvrzování polyaminy a anhydridy dikarboxylových kyselin. Mechanismem reakce je polyadice, kdy dochází k navázání atomu vodíku z tvrdidla na kyslíkový atom epoxidové skupiny. Při polyadici nedochází k řetězové reakci, jako tomu je u radikálové reakce a proces vytvrzování trvá déle. Do reakce vstupuje několik molekul pryskyřice s molekulami tvrdidla. Množství tvrdidla k reakci je nutno spočítat. Vypočítá se podle epoxidového ekvivalentu pryskyřice a vodíkového ekvivalentu polyaminu. [9; 14]

Vlastnosti pryskyřice zaleží na druhu zvoleného tvrdidla a volbou vhodné kombinace pryskyřic, tvrdidel a přísad je možné dosáhnout různých vlastností pojiva pro konkrétní aplikace. Epoxidové pryskyřice mají velký význam jako dvousložkové nátěrové hmoty, lepidla a zalévací hmoty. V kompozitních materiálech slouží jako matrice pro vysoce kvalitní kompozity v kombinaci s vysokopevnostními vlákny, a využívají se i v letectví a kosmonautice. Pro zachování přesného složení laminátu se pro náročné aplikace využívají epoxidové prepregy. Epoxidové pryskyřice jsou nejčastěji používaným typem matric pro sportovní aplikace kompozitních materiálů. Příkladem mohou být rámy jízdních kol, sportovní a závodní lodě, vesla, golfové hole, hokejky, tenisové rakety, ale i rybářské pruty, stožáry pro windsurfing a mnoho dalších aplikací. [5; 13; 14; 15; 16, 17]

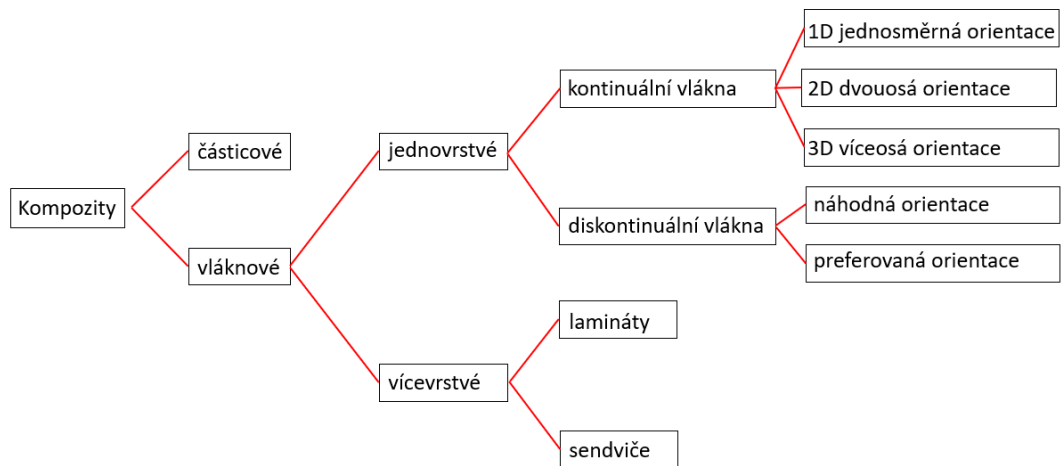
2.2.2.3. Vinylesterové pryskyřice

Vinylesterové pryskyřice jsou složeny z epoxidové pryskyřice a kyseliny akrylové nebo metakrylové. Z chemického hlediska jsou vlastnostmi podobné jak nenasyceným polyesterovým pryskyřicím, tak pryskyřicím epoxidovým. Zpracovávají se stejně jako nenasycené polyesterové pryskyřice. Reaktivním monomerem je většinou styren, také obsahují reaktivní dvojně vazby a vytvrzování probíhá radikálovým mechanismem. Ve srovnání s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi jsou houževnatější, chemicky odolnější a dražší. Oproti epoxidovým pryskyřicím jsou levnější a díky nižší viskozitě snáze zpracovatelné. Vzhledem ke kombinaci vlastností nenasycených polyesterových a epoxidových pryskyřic jsou vinylesterové pryskyřice téměř výhradně použity v aplikacích, kde vlastnosti nenasycených polyesterů nedostačují, než aby byly zbytečně použity drahé epoxidové pryskyřice. Časté je využití v korozivním prostředí. Bromované vinylesterové pryskyřice mají vysokou zhášecí schopnost. Jako výztuž vinylesterové matrice se využívají skleněná vlákna. Výsledný kompozit je možné najít u levnějších verzí sportovních a tréninkových lodí. [4; 9; 10; 17]

2.3. Výztuže

Výztuž je nespojitou (diskontinuální) fází kompozitu s vysokou pevností a modulem pružnosti E . Zatímco matrice zajišťuje ochranu výztuže před vnějšími vlivy, rovnoměrné rozdělení vnějšího zatížení a geometrickou stálost výztuže, úkolem výztuže je poskytovat kompozitu pevnost a tuhost, která závisí na jejích mechanických vlastnostech. Mechanismus pevnostního chování závisí na tvaru, koncentraci a orientaci výztuže. Koncentrace výztuže je jedním z nejdůležitějších parametrů kompozitu a je udávána jako hmotnostní nebo objemový podíl. [1; 5; 9]

Kompozity je možné dělit podle geometrie výztuže. V základu se dělí podle tvaru do dvou skupin na částicové a vláknové. Vláknové kompozity se dále dělí podle počtu vrstev na jednovrstvé a vícevrstvé. Vlákná jsou dlouhá (kontinuální) i krátká (diskontinuální) a mohou být uspořádaná nebo mít nahodilou orientaci. Základní dělení kompozitů podle geometrie výztuže je znázorněno na obrázku 7. Izotropie systému závisí na orientaci vyztužující fáze. Pokud má výztuž ve všech směrech přibližně stejný tvar a rozměry, je systém izotropní. Příkladem jsou různé práškové materiály. Naopak u vláknových výztuží je anizotropie charakteristickou vlastností. [1; 5]



Obrázek 7: Dělení kompozitů podle geometrie výztuže

2.3.1. Částicové výztuže

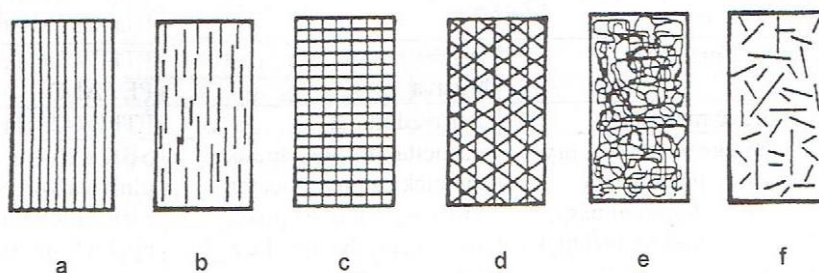
Částice se v kompozitech využívají především pro zlepšení vlastností materiálu matrice. Upravuje se například tepelná a elektrická vodivost, tepelná odolnost, zvyšuje se odolnost vůči opotřebení a tvrdost či se redukuje tření. Částice se také podílejí na přenosu namáhání, ale v menší míře než vlákna. Zpevnění materiálu je dosaženo působením částic, které zvyšují odpor proti působení nevratných plastických deformací. Existují dva druhy zpevnění, které se odvíjejí od velikosti částic. Pokud jsou částice menší než 0,2 μm , dochází k tzv. disperznímu zpevnění, které se uplatňuje především u kompozitů s kovovou matricí. Působením jemných částic dojde k brždění skluzového pohybu dislokací a vzniku bariér. U částic větších než 1 μm nastává kohezní silové působení v okolí částic a účinek je založen hlavně na objemovém podílu vyztužující fáze. Tento efekt je označován jako zpevnění samostatnými částicemi a je využíván u kompozitů s polymerní matricí. S množstvím dispergovaných částic výztuže stoupají i požadované vlastnosti, ale pouze do určité koncentrace. Poté dochází ke vzniku agregátů částic a rapidnímu zhoršení vlastností kompozitu. Je žádoucí, aby byly částice v kompozitu rozloženy rovnoměrně. Proto je často součástí zpracování intenzivní míchání. V kombinaci s polymerními matricemi se jako částicové výztuže využívají minerální prášky (kaolin, mastek, slída, vápenec), kovové prášky (Al, Cu, Ag), polytetrafluoretylen či feromagnetické oxidy železa. Tyto kompozity nacházejí využití především v oblasti konstrukčních materiálů a v elektrotechnice. [1; 2]

2.3.2. Vlákenné výztuže

Vlákna se v kompozitech využívají, protože jsou lehká, tuhá a silná. Jsou pevnější než materiál v kompaktní formě, ze kterého jsou vlákna vyrobená. Je to způsobeno orientací makromolekul podél osy vlákna a menším počtem defektů přítomných ve vláknech ve srovnání s kompaktní hmotou. Vlákna narovnaná ve velkém počtu u sebe tvoří jednovrstvý kompozit o tloušťce asi 0,1 mm. Tato anizotropní elementární vrstva se nazývá lamina a není možné jí použít samostatně. Spojením několika stejných nebo odlišných vrstev (lamin) vzniká vícevrstvý kompozit, který je obecně označován jako laminát. Hybridní lamináty se vyrábí z lamin různých materiálů, kdy se materiály vyztužených vrstev střídají. Touto metodou lze dosáhnout například zvýšení odolnosti proti poškození rázem ve směru kolmém na roviny vrstev. Někdy se pro výrobu vícevrstvých kompozitů využívají prepregy. Jedná se o předimpregnovanou

výztuž částečně vytvrzenými pryskyřicemi a mezi hlavní výhody patří přesně definované složení a přesné uložení výztuže. [1; 4; 10]

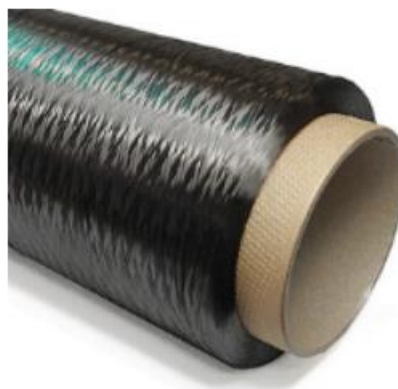
Jednosměrné uložení dlouhých vláken dává kompozitu anizotropní vlastnosti. Maximálních hodnot tuhosti a pevnosti je dosaženo ve směru vláken. Ve směru kolmém na vlákna jsou tyto hodnoty minimální. Použitím dvouosého či víceosého upořádání průběžných vláken je dosažen menší stupeň anizotropie. Pokud je potřeba, aby měl kompozit ve všech směrech stejné vlastnosti, jsou použita vlákna s nahodilou orientací. Takový kompozit je možné považovat za izotropní, případně pseudoizotropní. Uspořádání vláknové výztuže v kompozitech je znázorněno na obrázku 8. Poměr délky vlákna k jeho průměru se blíží k nekonečnu. Průměr se pohybuje řádově okolo 10 μm , což umožňuje jejich zpracování na textilních strojích. Nejběžnějšími typy vláknových výztuží používaných v kompozitech jsou vlákna skleněná (G – glass), uhlíková (C – carbon) a aramidová (A – aramid). [1; 2; 4; 10]



Obrázek 8: Uspořádání vláknové výztuže v kompozitech [1]
a – jednosměrné dlouhých vláken, b – jednosměrné krátkých vláken, c – dvouosé, d – víceosé,
e – nahodilá orientace vláken, f – nahodilá orientace krátkých vláken.

V konstrukčních aplikacích je možno využít různé druhy vláken v závislosti na jejich vlastnostech. Podle délky se rozlišují diskontinuální a kontinuální vlákna, podle modulu pružnosti jsou vlákna nízkomodulová (LM – low modulus), středněmodulová (MM – medium modulus), vysokomodulová (HM – high modulus) a ultravysokomodulová (UHM – ultrahigh modulus). Podle chemického složení jsou rozlišována vlákna organická a anorganická. Mezi anorganická vlákna se řadí vlákna skleněná, uhlíková (obrázek 9), borová, keramická a kovová. Organická vlákna jsou vlákna polymerní. Krátká vlákna o délce několika milimetrů až centimetrů jsou využívána jako výztuž v podobě netkaných textilií a rohoží. Typickými výrobními postupy jsou vstřikování a vytlačování, které jsou ekonomicky výhodné. Uplatnění těchto kompozitů se nachází v mnoha technických oborech. Především jako výlisky v automobilovém průmyslu a v elektrotechnice a jako strojní součástky s vlastnostmi

upravenými na míru, podle konkrétní aplikace. Dlouhá vlákna jsou používána ve své podobě nebo se tkají. Výroba kompozitů s dlouhými vlákny je velmi nákladná a pomalá a využívají se speciální výrobní postupy, mezi které patří například ruční kladení za mokra, lisování v autoklávu, lisování pomocí tlakového vaku, či vysokotlaké vstřikování. Uspořádání dlouhých vláken v matrici kompozitu může být jednosměrné, dvouosé nebo víceosé a kompozity jsou jednovrstvé a vícevrstvé (i hybridní). [1; 4; 5]



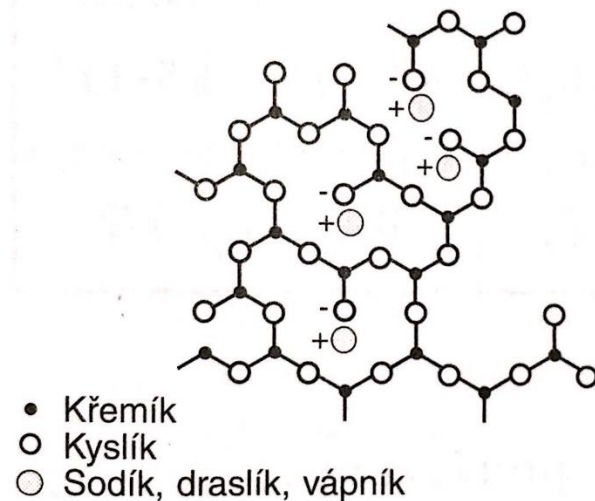
Obrázek 9: Uhlíkové vlákno HM [18]

Díky použití vláknových kompozitů je možné vyrábět díly přímo v požadovaném tvaru s izotropií jejich vlastností na míru podle požadavků. Většina laminátů je vyrobena symetricky kolem střední vrstvy, a to zaručuje tvarovou stálost laminátu při změnách teploty. U výsledného materiálu se neprojevují negativní mechanické vlastnosti složek a je dosaženo synergického efektu. [1]

2.3.2.1. Skleněná vlákna

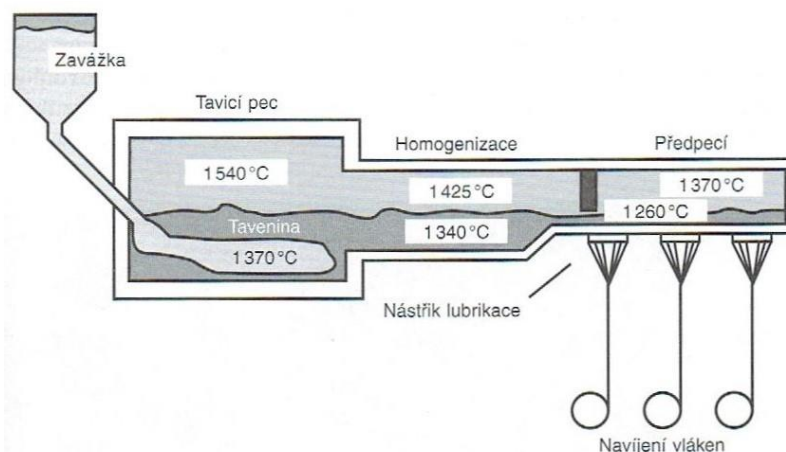
Skleněná vlákna mají hustotu okolo $2,5 \text{ g/cm}^3$, tuhost 80–100 GPa a jsou málo odolná proti únavě. Jejich vysoká pevnost je snižována lubrikací. Na rozdíl od uhlíkových a aramidových vláken jsou skleněná vlákna díky amorfní struktuře (obrázek 10) izotropní. Podle vlastností a chemického složení skloviny existují různá označení. Nejčastěji se pro výrobu vláken používá E – sklovina, která tvoří jako standardní typ téměř 90 % trhu. Jedná se o bezalkalickou sklovinu, která je vynikajícím elektrickým izolantem (E – elektrická) s vysokou prostupností pro záření. Dalšími typy jsou například v Evropě označovaná R – sklovina (R – resistance), která má vyšší pevnost. V USA nese označení S – sklovina

(S – strength), v Japonsku T – sklovina. C – sklovina je velmi odolná proti kyselinám a vysoce agresivním látkám. Pokud je bezboritá, nese označení ECR – sklovina. Skleněná vlákna jsou lehká, pružná a především levná. Proto jsou nejčastěji používaným typem výztuže v běžně dostupných aplikacích. [1; 9; 15]



Obrázek 10: Struktura skleněného vlákna [9]

Skleněná vlákna se vyrábí tažením z platinových trysek. Schéma výroby je znázorněno na obrázku 11. Ve sklářské peci dochází k tavení výchozích surovin (křemičitý písek, vápenec, kaolin, dolomit, kyselina boritá a kazivec) na E-sklovinu, kde se několik dní čirí a v tekutém stavu se vede do spřádacích trysek z platinové slitiny. Sklovina pomalu z trysek vytéká a tuhne do vláken o tloušťce asi 2 mm. Na čerstvě tažená vlákna se nanáší šlichta (lubrikace), která snižuje abrazi vláken. Používají se buď různé oleje, které je potřeba před zpracováním vláken do kompozitu odstranit nebo vazebné prostředky, které zároveň zlepšují přilnavost vláken k matrici. Výsledného průměru vláken se dosáhne dlužením vysoce viskózních vláken na velmi rychle rotujícím navíjecím zařízení. Dochází k prodloužení až na 40 000násobnou délku a spřádáním takto vyrobených elementárních vláken vzniká ohebné spřádací vlákno. [9]



Obrázek 11: Schéma výroby skleněných vláken [9]

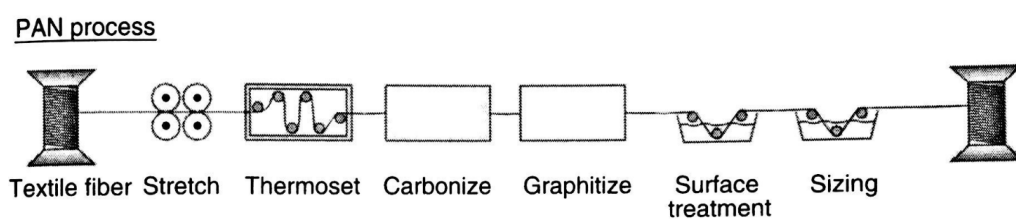
Skleněná vlákna nachází uplatnění v kompozitech v kombinaci s matricemi z nenasycených polyesterových pryskyřic a vinylesterových pryskyřic. Jedná se o cenově dostupnější materiály a používají se v levnějších sportovních aplikacích. Typickým rozdílem oproti dražším kompozitům je o něco vyšší hmotnost, která je vykompenzována vyšší odolností materiálu, a to je žádoucí například u tréninkových lodí. Skleněná vlákna se využívají také jako výztuž v rámech jízdních kol, v hokejkách, snowboardech, ledních bruslích, prknech pro windsurfing, náčiní pro lukostřelbu a v mnoha dalších aplikacích. Často se používají v kombinaci s jinými druhy vláken a v sendvičových strukturách. [17; 19]

2.3.2.2. Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou velmi lehká a silná vlákna s výbornou odolností proti chemikáliím. Oproti vláknům skleněným mají asi desetinásobnou tuhost a poloviční hustotu. Obsahují okolo 90–95 % čistého uhlíku. Pevnost při pokojové teplotě je nižší než u skleněných a aramidových vláken, ale výhodou je, že pevnost neklesá až do hodnot teplot okolo 1000 °C. Do této teploty jsou uhlíková vlákna stabilní a chemicky inertní. Na rozdíl od skla mají vysokou odolnost proti únavě, ale velmi špatnou odolnost proti ostrým ohybům. Jsou elektricky vodivá, mají minimální teplotní roztažnost a jsou silně anizotropní. Uhlíková vlákna mohou být označována i jako grafitová a toto označení závisí na procentu obsaženého uhlíku, kdy převažuje buď amorfni uhlík nebo krystalický grafit. Velmi důležitou roli při aplikacích hraje vysoká cena. [1; 5]

Uhlíková vlákna je možné připravit třemi způsoby, a to tepelným rozkladem uhlovodíků, odpařováním z obloukového výboje mezi uhlíkovými elektrodami a pyrolýzou

polymerů, což je dnes nejčastější metoda. K pyrolýze se využívají PAN (polyakrylonitrilová) vlákna nebo smoly. Vlákna vyrobená ze smol jsou levnější, ale nejsou tak silná. Schéma výroby vláken z PAN je znázorněno na obrázku 12. Prvním krokem přípravy vláken z PAN je stabilizace, kdy probíhá oxidace na vzduchu při teplotě okolo 200–300 °C po dobu 60–120 minut a dochází k zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vlákno zčerná a je netavitelné. Dále se vlákno upravuje tak, že se odstraní vodík a sníží obsah kyslíku a dusíku, aby dosahovalo nejvyšší pevnosti (obsah uhlíku je 80-95 %). Tento krok se nazývá karbonizace a je prováděn po dobu 30–60 vteřin při teplotě 1200–1500 °C v dusíku. Grafítizací, 15–20 vteřin při teplotě 2000–3000 °C v dusíku s argonem, dochází ke zvýšení obsahu uhlíku a k překrystalizaci na grafit. Pevnost vlákna klesá s rostoucí velikostí krystalků, a to je důvod, proč je možné vyrábět grafitová vlákna buď s vysokou pevností (označována HT) nebo s vysokou tuhostí (HM). [1; 5]



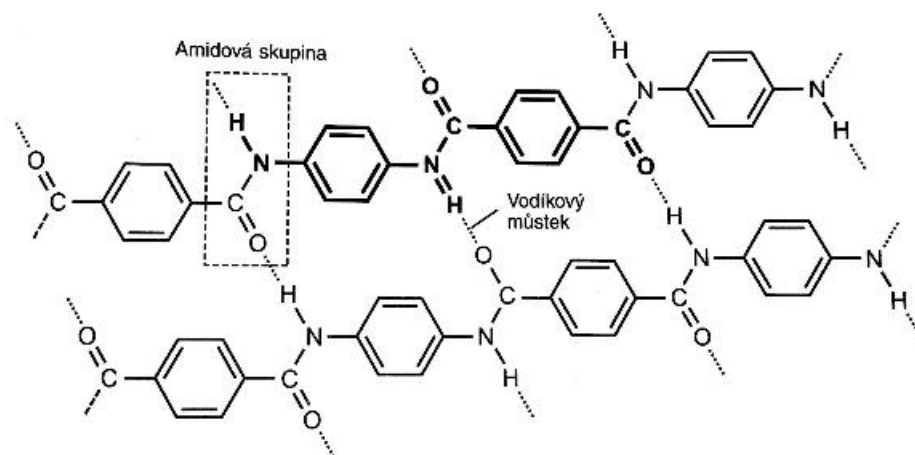
Obrázek 12: Schéma výroby uhlíkových vláken pyrolýzou PAN [10]

Uhlíková vlákna se používají nejčastěji v kombinaci s epoxidovou matricí. Díky svým vynikajícím vlastnostem v kombinaci s velmi nízkou hmotností nachází uplatnění v dražších sportovních aplikacích. Příkladem aplikací mohou být rámy jízdních kol, lehké závodní lodě, ale také basebalové pálky, tenisové rakety, golfové hole, rybářské pruty, snowboardy, lední brusle, luky a další. [10; 19]

2.3.2.3. Aramidová vlákna

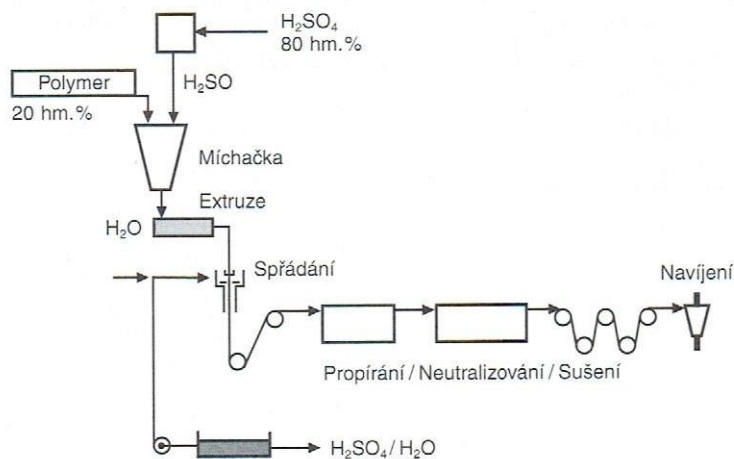
Aramidová vlákna se řadí do skupiny polymerních vláken. Typickými vlastnostmi této skupiny vláken jsou nízká hustota, středně vysoká pevnost, malá tuhost a poměrně velké prodloužení při přetržení. Dosahují ale vynikajících hodnot měrné pevnosti (pevnost vydělená hustotou) a měrné tuhosti (Youngův modul vydělený hustotou). Zpracování polymeru na vlákna zahrnuje dva základní kroky: převedení tuhého kompaktního polymeru do formy taveniny nebo roztoku a následné vytlačování a chlazení. [1; 5]

Jako aramidy se označují aromatické polyamidy, které mají oproti lineárním polyamidům vynikající pevnostní charakteristiky. Typickým zástupcem je Kevlar, jehož vzorec je znázorněn na obrázku 13. Molekuly jsou spojeny vodíkovými můstky a aromatická jádra v řetězcích zajišťují vysokou tuhost. Kevlar je obchodní název polyfenylentereftalamidových vláken firmy DuPont a byl poprvé cíleně použit v roce 1971 jako výztuž v pneumatikách automobilů. [1; 9; 10]



Obrázek 13: Struktura aromatického polyamidu [9]

Aramidová vlákna není možné spřádat z taveniny, protože teplota roztavení je vyšší než teplota tepelného rozkladu. Vyrábí se proto spřádáním z vysokoviskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové (obrázek 14). Elementární vlákna se spojují a dále se několikrát propírají, neutralizují, ošetřují pomocnými chemickými prostředky a na závěr se suší. Aramidové vlákno je nejlehčí vyztužující vlákno s vysokou měrnou pevností v tahu, silnou anizotropií a je vhodné pro lehké konstrukce s tahovým namáháním. Není vhodné pro konstrukce namáhané ohybem nebo tlakem. Aramidová vlákna se často se používají společně s jiným typem vlákna ve formě hybridních výztuží. [9; 11]



Obrázek 14: Schéma výroby aramidových vláken [9]

V cyklistice se aramidová vlákna využívají při výrobě diskových kol, protože oproti běžným kolům snižují odpor větru až o polovinu. Také se uplatňují jako výztuž v pláštích, jejichž hmotnost tak lze snížit pod hranici 0,1 kg. Extrémně lehká kola a pláště zmenšují valivé tření. Dalším příkladem využití aramidových vláken je výroba sportovních saní. [19]

2.3.2.4. Borová vlákna

Borová vlákna se vyznačují kombinací vysoké pevnosti a tuhosti společně s nízkou hustotou. Používají se zejména v kosmickém průmyslu a ve sportovních aplikacích. Hodnoty pevnosti jsou řízeny statistickým rozložením vad během zpracování. Dobré mechanické vlastnosti zůstávají zachovány i při vysokých teplotách (pevnost v tahu při teplotě 500 °C dosahuje 60 % původní hodnoty pevnosti v tahu při pokojové teplotě). Vyznačují se také vysokou vrubovou houževnatostí (průrazuvzdorností) a odolností proti únavě. Jsou křehká s nízkou rázovou houževnatostí. Přípravují se na wolframovém vlákně, které katalyzuje reakci mezi chloridem boritým a vodíkem při teplotě 1200 °C. Výsledná vlákna mají průměr okolo 100 μm a rychlost růstu vlákna se pohybuje kolem jednoho mikrometru za minutu. Proto jsou borová vlákna nejdražším typem vláken a tam, kde je to možné, se nahrazují vlákny uhlíkovými. [4; 5]

Borová vlákna se většinou používají ve formě prepregů o složení 70 % vláken a 30 % pryskyřice. Pro sportovní aplikace se využívají v kombinaci s matricemi z epoxidových pryskyřic jako velmi drahé high-tech kompozity. Společně s uhlíkovými vlákny se vyrábí hybridní kompozity, protože poskytují tenčí a lehčí lamináty o stejné tvrdosti. Borová vlákna se využívají jako výztuž hliníku při výrobě rámu kol, protože výsledný kompozit je lehčí,

pevnější a tužší než samotný hliník. V kombinaci s aramidovými vlákny se používá hybridní kompozit pro výrobu vodních lyží. [11; 19; 20]

2.3.3. Geometrické uspořádání vláknových výztuží

Vlákna využívaná jako výztuž v kompozitech jsou vyráběna v podobě kontinuálních elementárních vláken, která se dále zpracovávají do konečné formy, ve které se používají. Samostatně se jednotlivá vlákna používají jako výztuž jen výjimečně. Elementární vlákno se zpracovává do formy příze a ta se nadále využívá k textilnímu zpracování. Stejně tak, jako je důležitý typ výztuže, je důležitá i její forma. [9; 10]

2.3.3.1. Jednovrstvé kompozity

Kromě kontinuálních a diskontinuálních vláken existují alternativy výztuží, které usnadňují výrobu, zvyšují její rychlost a tím dochází ke snižování nákladů při zpracování. Vlastnosti a uspořádání výztuže určují výsledné vlastnosti kompozitu. Například se zvyšujícím se počtem zákrutů na vlákně klesá jeho modul pružnosti v tahu, ale zároveň stoupá odolnost proti únavě materiálu. Podle směru orientace vláken se dělí výztuže do tří skupin na vlákna jednosměrná (1D), s dvouosou (2D) a s víceosou orientací (3D). [5]

- 1D: prameny, příze, rovingy (pramence)
- 2D: tkaniny, rohože
- 3D: připravují se speciálními zpracovatelskými postupy textilního průmyslu a vznikají kompozitní struktury vyztužené ve všech třech směrech prosycené pryskyřicí, které je možné dále zpracovávat jako pevný, kompaktní materiál (obrázek 15). [5]



Obrázek 15: 3D výztuž příruby [9]

Pramen

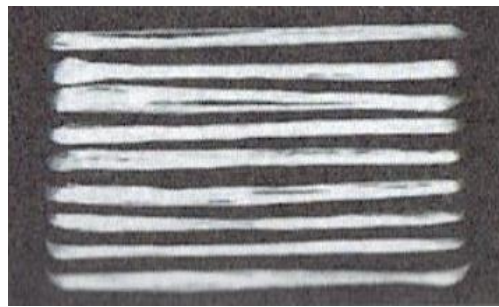
Pramen je nekroucený svazek cca 200 elementárních vláken spojených lubrikací, vyrobených ve stejný čas v jedné peci. [5; 9]

Příze

Příze je označení pro kroucená nebo nekroucená vlákna, která jsou určena k textilnímu zpracování. [5; 9]

Roving (pramenec)

Roving (obrázek 16) je tvořen sdružením určitého počtu základních pramenů bez jejich zakrucování. Vyrábí se navíjením přesného počtu pramenů potřebných k dosažení žádoucí hmotnosti na jednotku délky vlákna. Hmotnost 1 km příze v g udává parametr jemnost vláken a jednotkou je tex. [5]



Obrázek 16: Skleněné rovingy [9]

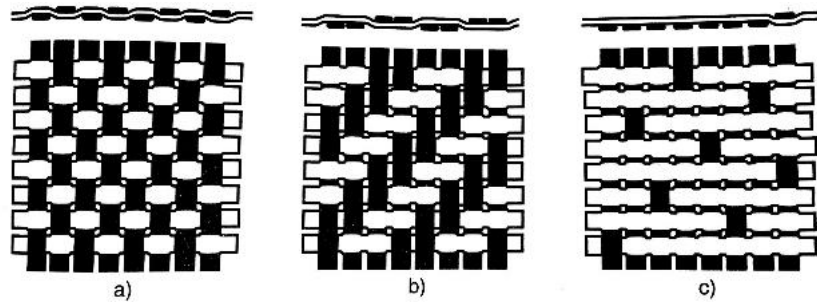
Tkaniny

Tkané textilie patří do skupiny výztuží s dvouosou orientací, vytvořených z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově. Rozdílné typy křížení vláken se nazývají vazby. Výhodou tkanin oproti jednosměrně orientované výztuži je snadnost zpracování. Nevýhodou však je ztráta mechanických vlastností vlivem zvlněného uložení vláken. [5; 9]

Druhy vazeb (obrázek 17): [9]

- **Plátňová vazba** – základní druh vazby, dobrá rozměrová stálost a malý otřep při řezání umožňují snadné zpracování.
- **Keprová vazba** – menší zvlnění vláken má za následek větší otřep, což znesnadňuje zpracování. Tento typ vazby způsobuje, že je tkanina ohebnější a je proto vhodnější pro tvarované prvky než vazba plátňová.

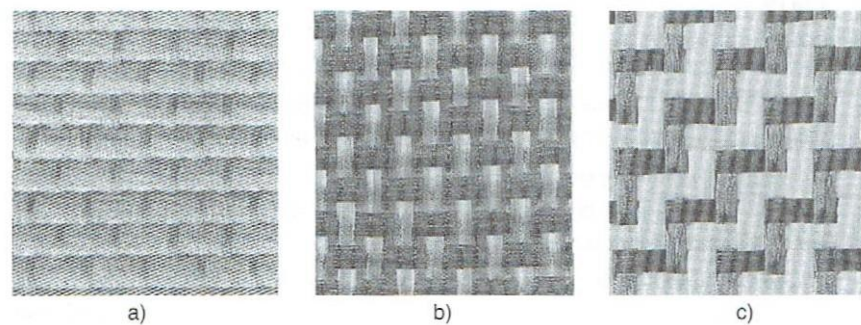
- **Atlasová (saténová) vazba** – má malé vychýlení vláken, které umožňuje dosáhnout hladkého povrchu a je vhodná pro prostorově složité prvky.



Obrázek 17: Druhy vazeb tkanin [9]

a) plátnová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová (saténová) vazba

Tkaniny mohou mít různou skladbu vláken v osnově a útku. Vznikají tak jednosměrné, směsné a hybridní tkaniny (obrázek 18). [9]



Obrázek 18: Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku [9]

a) jednosměrná tkanina, b) směsná tkanina, c) hybridní tkanina

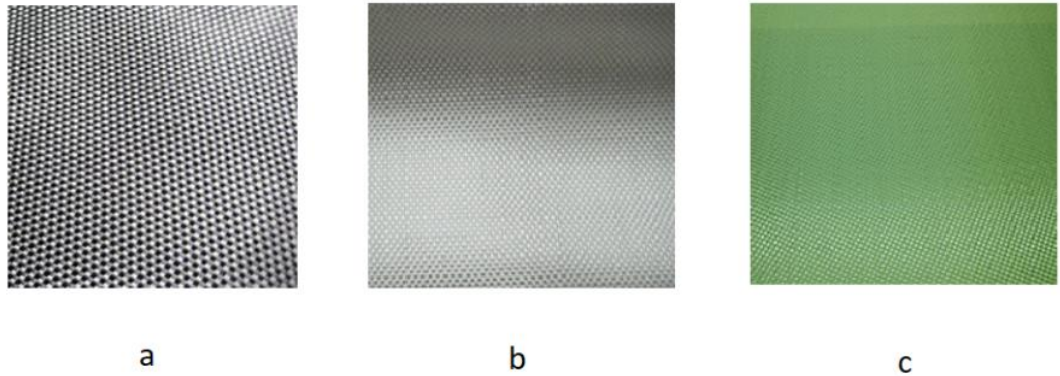
- **Jednosměrná tkanina** – tenká vlákna fixují vlákna v osnově. Používá se pro aplikace vyžadující vysokou pevnost a tuhost při jednosměrném namáhání, například u lyží. Tuhosti ve více směrech se docílí vrstvením v potřebném směru a na potřebném místě. Dochází k redukci vláken tam, kde nejsou potřeba, a to vede ke snížení hmotnosti kompozitu. Velmi podobnou strukturu mají **jednosměrné pásy** (obrázek 19) – jednosměrně uložená, nezvlněná netkaná vlákna mohou být spojena útkovými vlákny s většími odstupy nebo lepicími rohožemi. Na rozdíl od tkanin je možné je ukládat pod libovolným úhlem. [9, 18]



Obrázek 19: Jednosměrná uhlíková vlákna [18]

- **Směsná tkanina** – vzniká použitím dvou různých druhů vláken v osnově a v útku. Například tam, kde není požadována vysoká tuhost v příčném směru, je možné nahradit drahá karbonová vlákna v útku cenově výhodnějšími skleněnými vlákny a tím redukovat náklady na výrobu. [9]
- **Hybridní tkanina** – využívá se potřebných vlastností vláken v tkanině kombinací různých druhů jak v útku, tak v osnově. Například se využívá kombinace rázové houževnatosti aramidových vláken s tuhostí uhlíkových vláken. [9]

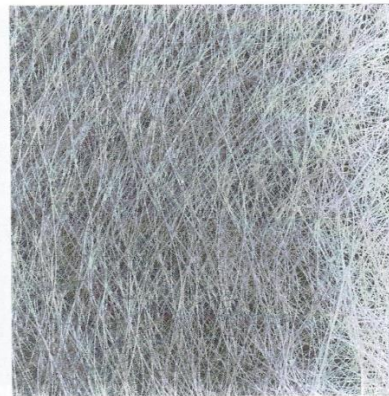
Ve formě tkanin se jako výztuž využívají karbon, sklo i kevlar (obrázek 20). Tkané karbonové vlákno je nejvíce ceněno pro vysoký poměr pevnosti k objemu a mimořádnou tuhost. Je však dražší a křehčí než ostatní varianty. Plasty, vyztužené skleněnými vlákny, tkané do fólie jsou levnější, než uhlíková nebo kevlarová vlákna. Kevlar má také vysoký poměr pevnosti vůči objemu, ale je těžší a méně tuhý než uhlík. Výhodou oproti uhlíku je vyšší míra únavové odolnosti materiálu a příznivější cena. [18]



Obrázek 20: a – karbonová tkanina, b – skleněná tkanina, c – kevlarová tkanina [18]

Rohož

Nejlevnější formou textilní tkaniny je netkaná textilie, označovaná jako rohož. Jedná se o plošnou výztuž skládající se z nekonečných nebo sekaných, nahodile orientovaných, pramenců vláken spojených pojivem. Označení CSM (continuous strand mat) se používá pro rohož z kontinuálních vláken, vyrobenou z kontinuálních vláken nebo rovingů rozprostřených přes sebe a spojených velmi malým množstvím lepidla (obrázek 21). [5; 9]



Obrázek 21: Rohož z kontinuálních vláken [10]

Někdy jsou rohože lépe upevněny sešíváním na podkladovou plochu, případně bez podkladové plochy mohou být sešívány k sobě. Vznikají tak šité netkané textilie. (obrázek 22). [5; 9]



Obrázek 22: Šitá netkaná textilie [5]

Prepregy

Prepregy jsou částečně vytvrzené lisovací hmoty. Přesněji se jedná o předimpregnovaná vlákna částečně vytvrzenou pryskyřicí, která se dále zpracovávají lisováním nebo v autoklávu. Z reaktoplastů se nejčastěji využívají nenasyčené polyesterové, vinylesterové a epoxidové pryskyřice. Po finálním vytvarování nebo v jeho průběhu je vytvrzení dosaženo zahřátím za vysokého tlaku. Mezi výhody prepregů patří kromě přesně definovaného složení i oddělení složitého procesu prosycování výztuže pojivem od zpracování. Prosycování výztuže pojivem je možné provádět za kontrolovaných podmínek a je tak zajištěna vysoká jakost výrobku. Používají pro výrobu velmi drahých kompozitů. Kromě ceny je problém i s jejich skladováním, aby nedošlo k zesíťování pojiva. Například prepregy s epoxidovou pryskyřicí je nutno skladovat při teplotě nižší než $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Doba skladovatelnosti při těchto podmínkách je 6–12 měsíců. Pro vysokopevnostní aplikace se používají jednosměrné nebo tkaninové prepregy. [4; 10; 11]

2.3.3.2. Vícevrstvé kompozity

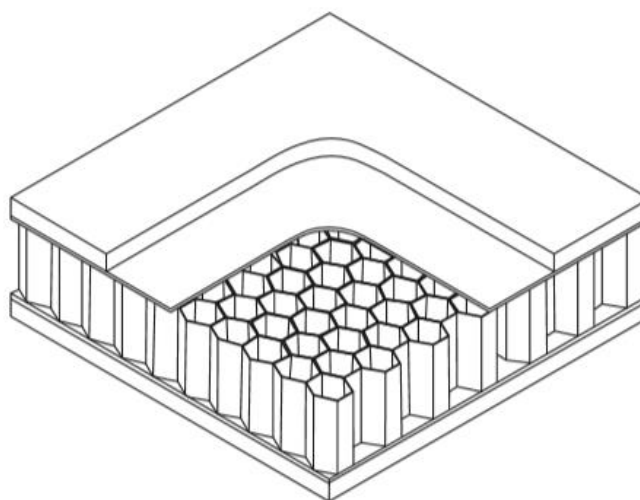
Lamináty

Lamináty jsou vícevrstvé kompozity vzniklé spojením několika stejných nebo odlišných vrstev zvaných lamin. Pokud se materiály v jednotlivých vrstvách střídají, jedná se o hybridní lamináty, které se používají pro zlepšení mechanických vlastností kompozitu. Pro výrobu se využívají prepregy a proces výroby se nazývá laminování. Jednou ze základních výhod laminátů je přizpůsobení orientace vláken a uzpůsobení vlastností kompozitu přímo pro danou aplikaci. Podle směru vláken v jednotlivých

vrstvách vznikají lamináty unidirekcionální (jednosměrné) a multidirekcionální (vícesměrné). Jednosměrné lamináty se využívají v aplikacích s jednosměrnou zátěží. Pro příklad, pevnost v tahu unidirekcionálních karbonových vláken v jejich směru je 1760 MPa, zatímco kolmo na směr vláken pouze 80 MPa. [1; 4; 11]

Sendviče

Sendvičová struktura se skládá z lehkého jádra a dvou tenkých tuhých vrstev, které těsně přiléhají z obou stran k jádru, jak je vidět na obrázku 23 a může mít různé tvary. Pokud je tuhost v ohybu kompozitu nedostatečná, je sendvičová struktura alternativou řešení s minimálním zvýšením hmotnosti kompozitu. Tyto kompozity mají vysoký poměr tuhosti v ohybu k hmotnosti a vynikající tepelně izolační vlastnosti. Nejsou však akustickými izolanty, kvůli většině typů materiálů jader nejsou odolné proti požáru a častěji se prohýbají než klasické struktury. Ve sportu se využívají například při konstrukci lodí, lyží, surfovacích prken či při výrobě přileb. [4; 10; 11; 21]



Obrázek 23: Schéma sendvičové struktury s voštinou [21]

Pro výrobu jádra se využívají:

- **Pěny** – jsou nejpoužívanějším materiálem pro výrobu jádra. Jejich vlastnosti závisí jak na použitém polymeru, tak na tloušťce materiálu, velikosti buněk, zda jsou buňky otevřené či uzavřené a na dalších vlastnostech. Příkladem mohou být polystyrenové pěny, které se využívají při výrobě surfovacích prken nebo polyurethanové pěny využívané při konstrukci lyží. [10; 11]

- **Voštiny** – struktury s hexagonálními nebo válcovými buňkami vyrobené z tenkých plechů hliníku, aramidu (Nomex), papíru nebo extrudovaného polypropylenu. Nomexová voština (obr. 24) je díky buněčné struktuře velmi flexibilní, díky čemuž je ideální pro použití v úzkých poloměrech, jako jsou lodní trupy. Využívá se v aplikacích, kde jsou vyžadovány vysoké poměry pevnosti k hmotnosti. [11; 20]



Obrázek 24: Nomexová voština [18]

- **Dřevo** – nejčastěji se používá balza, která má relativně nízkou hustotu, je cenově dostupná a má vhodné mechanické vlastnosti. Byla prvním materiálem použitým pro konstrukci sendvičové struktury. Nejlevnějším používaným materiálem na bázi dřeva je překližka. [10; 11]

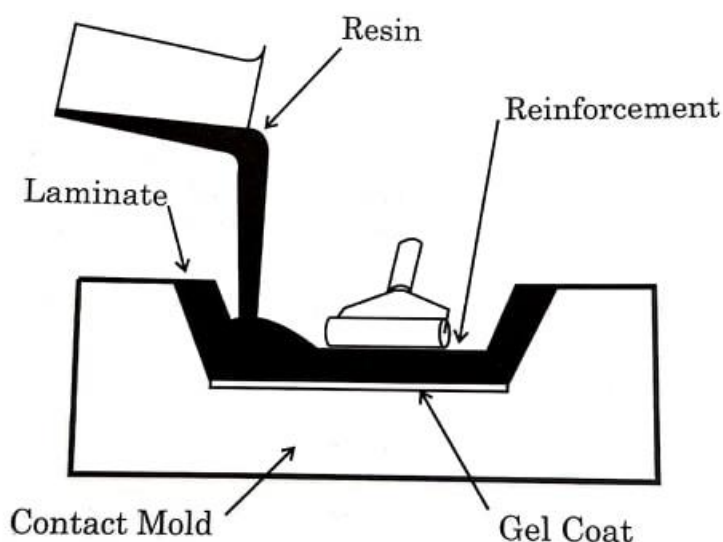
2.4. Technologie výroby

Kvalita kompozitu není dána pouze výběrem vhodných materiálů pro matrici a výztuž, ale také záleží na samotném zpracování výrobku. Existuje celá řada technologií výrob a každá technologie má svá specifika. Volba vhodné technologie závisí na typu matrice a výztuže, teplotě během zpracování a mnoha dalších faktorech, jako jsou například rozměry výrobku, objem produkce, rychlost výroby, obsah a orientace výztuže či kvalita povrchu výrobku. Technologický postup je tedy velmi důležitým faktorem, protože ovlivňuje jak konečné vlastnosti výrobku, tak i samotnou ekonomiku výroby. [5; 22]

V základu se výrobní technologie dělí do dvou skupin na „mokrě“ technologie, kdy jsou výztuže prosycovány pryskyřicí přímo ve formě a „suché“ technologie, při nichž se využívají prepregy. Technologií existuje celá řada a mezi hlavní patří: ruční kladení, stříkání, lisování, navíjení, pultruze (tažení), injektážní a infuzní technologie a odlévání. [9; 22]

2.4.1. Ruční kladení

Nejjednodušším pracovním postupem je ruční kladení (obrázek 25). Patří mezi nejstarší a nejrozšířenější postupy. Jedná se o otevřenou technologii. Používají se při ní jednoduché a levné pracovní pomůcky a je vhodná pro velkoplošné díly a prototypy. Nevýhodou je závislost jakosti výrobku na zkušenosti zpracovatele. [4; 9; 22]



Obrázek 25: Ruční kladení [5]

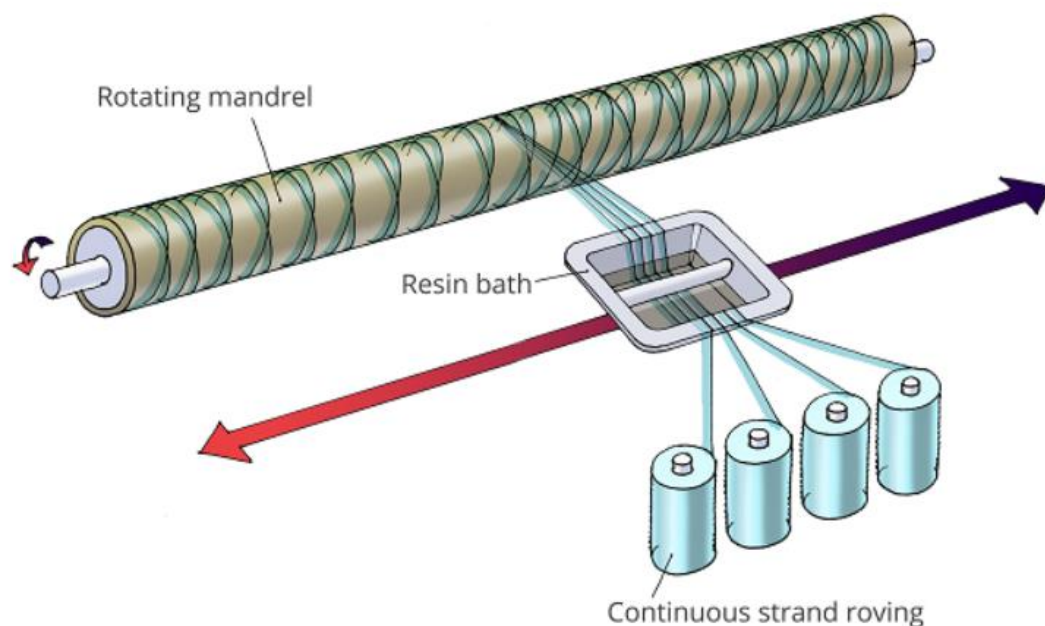
Podle počtu částí, vytvrzovacích teplot a tlaků se používají dřevěné, plastové, kompozitní či kovové formy. Permanentní formy používané pro dlouhé zpracovatelské cykly jsou většinou kovové. Negativní formy se nazývají matrice, pozitivní patrice a volba typu formy je závislá na tom, která strana povrchu výrobku musí být hladká. Na povrch formy se nejprve nanáší separační nátěr, který zajišťuje snadné vyjmutí výrobku z formy. Využívají se například vosky, polyvinylalkohol či silikony. Do takto připravené formy se ručně nebo stříkáním nanáší první vrstva zvaná gelcoat. Jedná se o nevyztuženou, často probarvenou vrstvu o tloušťce 0,3 – 1 mm, a kromě estetické stránky má funkci ochrannou. Po částečném vytvrzení gelcoatu následuje kladení vrstev výztuže a jejich prosycování štětcem nebo válečkem. Na závěr je odstraňována přebytečná pryskyřice a vzduchové bubliny rýhovaným válečkem. Vytvrzování většinou probíhá za normální teploty a tlaku. Pouze v případě sendvičových struktur se používá vakuum a pro zvýšení tepelné odolnosti výrobku se využívá postupné zvyšování teploty. [5; 22]

Rychlost a cena výroby závisí na zvolených materiálech, velikosti zpracovávaného výrobku a na složitosti výroby formy. Jako výztuž se nejčastěji používají skleněná, uhlíková a aramidová vlákna ve formě tkanin či netkaných textilií a matricemi jsou epoxidové a polyesterové pryskyřice. Mezi výhody patří kromě možnosti výroby velkých a tvarově složitých částí také nízké pořizovací náklady na zařízení, možnost výroby sendvičových struktur a vynikající povrchová úprava výrobků. Nevýhodami jsou dlouhá vytvrzovací doba při pokojové teplotě, vysoká emise škodlivých látek, kvalita výrobku závisící na zručnosti pracovníka, nízká výrobní rychlost a hladký povrch pouze na jedné straně výrobku. [5; 22]

Tato technologie je vhodná pro výrobu malých až velkých dílů, i pro tvarově složité, a pro malé série či prototypy. Využívá se například pro výrobu lodí a rámu kol. [5; 17; 19; 22]

2.4.2. Navíjení

Navíjení (obrázek 26) je mechanizovaná tvářecí technologie, při které se výztuž impregnovaná pojivem navíjí na jádro zvaný trn, až do pokrytí celého povrchu a dosažení požadované tloušťky materiálu. Vznikají tak dutá tělesa symetrická k ose otáčení, jako jsou například různé nádrže, trubky a nádoby. Rotační pohyb trnu spolu s dopředným a zpětným pohybem ukládacího ramene podél osy (suportu) umožňuje uložení pramenců podle určitého navíjecího vzoru. Proces je řízen počítačem. Kromě pramenců je možné navíjet výztuž i ve formě tkaniny a rohože. [5; 9; 22]



Obrázek 26: Navíjení [23]

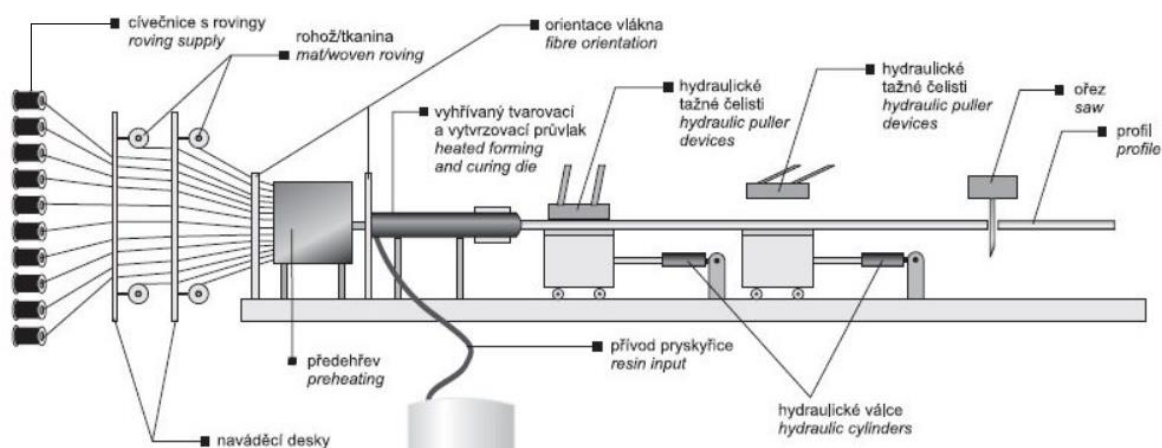
Úhel návínů je možné regulovat v rozmezí 90° (obvodový návín), přes křížový návín až po 0° (např. osově vyztužení trubek). Jako vyztuž se využívají skleněné, uhlíkové a aramidové pramence, tkaniny a rohože. Pojivem mohou být nenasycené polyesterové, vinylesterové i epoxidové pryskyřice. Pro složitější navíjené struktury, jako jsou například uzavřené nádrže, je možné použít tzv. ztracená jádra, která jsou vyrobená z rozpustných solí, sádry, pěny nebo kovových slitin s nízkou teplotou tání. Vytvrzení není tak dobré jako v autoklávu, ale má i své výhody, zejména díky kratší době zpracování a nižším nákladům na výrobu. Navíc je možné zpracovávat díly velkých rozměrů, které by byly jinak limitovány velikostí autoklávu. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady na výrobní zařízení. Rychlost procesu se velmi liší a závisí na velikosti výrobku, typu jádra a síle navíjeného vlákna. [5; 9; 22]

Tato technologie je používána pro výrobu symetrických dutých těles, jako jsou například rybářské pruty. Dalšími příklady sportovních potřeb vyrobených navíjením mohou být vesla, golfové hole, basebalové pálky, hokejky, tyče pro skok o tyči nebo lyžařské hůlky. [5; 19]

Podobnou technologií je technologie převzatá z textilního průmyslu, a to technologie oplétání. Na jádru vzniká struktura podobná tkanině a mnohonásobné překřížení vláken umožňuje výrobu složitých těles. Oplétáním se vyrábí tenisové rakety nové generace, jejichž držadlo a rám jsou vyrobeny z hadice z hybridu z uhlíkových a skleněných vláken. [9]

2.4.3. Pultruze (tažení)

Pultruze (obrázek 27) je kontinuální zpracovatelskou technologií používanou pro výrobu dutých, plných i tvarovaných profilů různé délky s vysokým obsahem výztuže (až 80 %). Jedná se o technologii, při které dochází k přímé přeměně kontinuálních vláken a pojiva ve finální produkt. Vlákná jsou kontinuálně impregnována iniciovanou pryskyřicí v lázni, a po prosycení a odstranění přebytečné pryskyřice tažena do speciálních tvarovacích a vytvrzovacích forem (průvlaků). Dutina těchto forem odpovídá vnějšímu tvaru vyráběných profilů. K vytvrzení dochází působením tepla. Kompozitní profil je odtahován hydraulickými čelistmi konstantní rychlostí a řezán na požadovanou délku. Suchou výztuž je také možno prosycovat až v počáteční sekci průvlastku. [5; 22; 23]



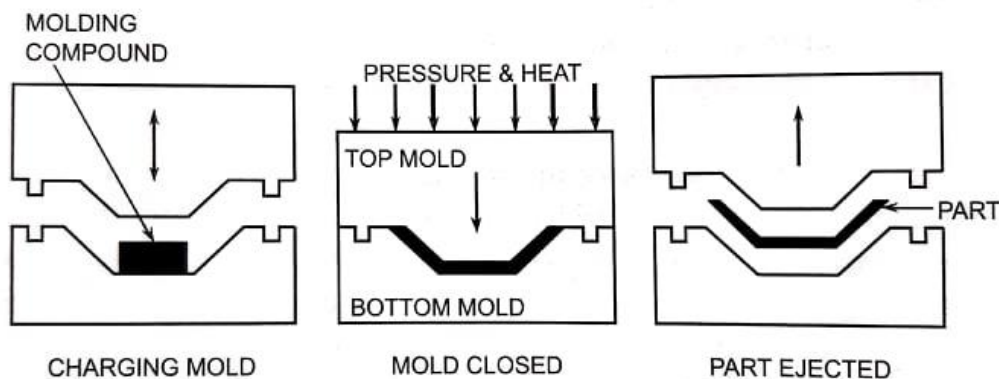
Obrázek 27: Pultruze [22]

Nejčastěji se zpracovávají skleněné a uhlíkové pramence a je možné je kombinovat s pásy z tkanin nebo rohoží pro dosažení příčného vyztužení. Jako pojivo se využívají nízkoviskózní nenasyčené polyesterové, vinylesterové a epoxidové pryskyřice schopné rychlého vytvrzení za zvýšených teplot kolem 80–160 °C. Používají se aditiva pro zlepšení hladkosti povrchu, pro snadnější probarvení, pigmenty a různá plniva pro dosažení finálních vlastností produktu. Značnými výhodami jsou rychlost a efektivita technologie, snadná kontrola nad množstvím pryskyřice, vysoká pevnost vyrobeného kompozitu a možnost zakrytí pryskyřičné lázně a tím snížení těkavých emisí. Nevýhodami pultruze je možnost vyrábět pouze součásti s konstantním nebo téměř konstantním průřezem a vysoké náklady na vyhřívání formy. [22; 24]

Pultruzí je možné vyrábět profily od velmi tenkých a jednoduchých profilů, až po složité a rozměrné tyče a trubky o průřezu až několik desítek centimetrů. Pro výztuž hokejek se využívají tímto způsobem vyrobené pásy o tloušťce přibližně 1 mm. Touto technologií se také vyrábí lyžařské hůlky, rybářské pruty či profily pro výrobu částí jízdních kol. [22; 24]

2.4.4. Lisování

Lisování je možné provádět za studena, za tepla a tlaku, pomocí vakua nebo v autoklávu. Lisování za studena probíhá v nevyhříváných oboustranných formách, a tím je dosažen oboustranně hladký povrch výlisku. Lisování za tepla a tlaku (obrázek 28) se provádí ve vyhříváných formách a výchozím materiálem jsou buď prepregy – lisovací rohože (SMC – sheet moulding compounds), lisovací těsta (DMC – dough moulding compounds) nebo lisovací směsi – premixy (BMC – bulk moulding compounds). Lisování za tepla je vhodné pro velkosériovou výrobu malých a středně velkých výrobků. Výhodami jsou snadná reprodukovatelnost kvality a rozměrů, krátké výrobní cykly a možnost automatizace procesu. Technologií lisování za tepla a tlaku se vyrábějí například surfovací prkna či lyže. [19; 22]

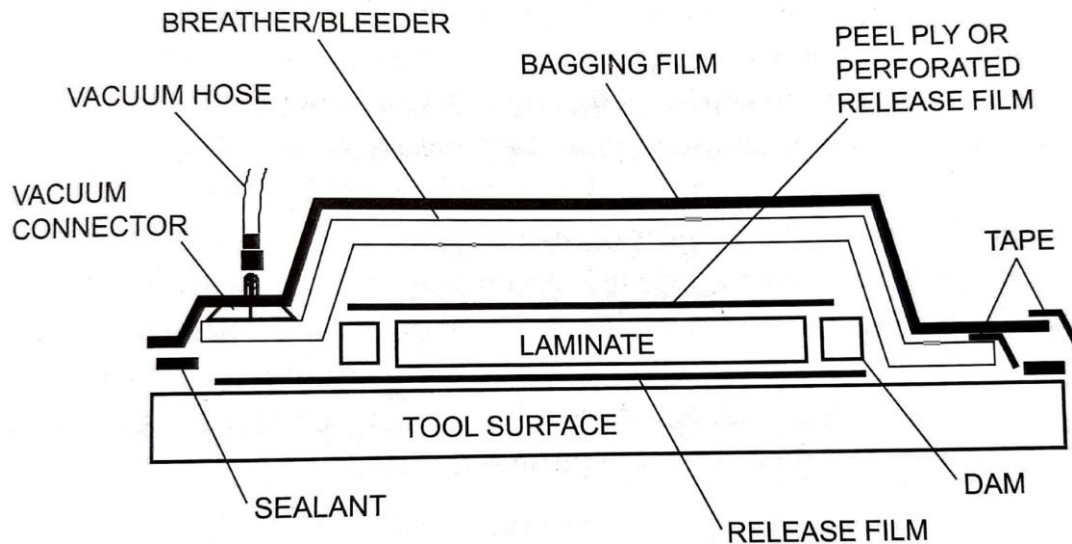


Obrázek 28: Lisování za tepla a tlaku [5]

2.4.4.1. Lisování pomocí vakua

Při lisování pomocí vakua (obrázek 29) se podobně jako u ručního kladení používá jednodílná forma. Touto technologií se vyrábí kompozity s vyšším obsahem výztuže, kterého se dosáhne odsátím přebytečného množství pryskyřice. Výsledný kompozit má lepší mechanické vlastnosti. Dále se používá při výrobě sendvičových struktur, pro zakomponování

tuhých sendvičových materiálů. V případě prosycování měkkých sendvičových materiálů pryskyřicí je nutno použít podstatně menší podtlak. [9; 22]



Obrázek 29: Lisování pomocí vakua [5]

Počáteční fáze technologie je stejná jako při ručním kladení. Po aplikaci materiálu do formy se na poslední vrstvy pokládá tzv. odtrhová (strhávací) fólie, která na povrchu kompozitu po odtržení zanechá vzor a usnadňuje tak další zpracování. Povrch není potřeba zdršňovat nebo brousit. Další vrstvou je perforovaná separační fólie a pro vstřebání přebytečné pryskyřice a odsátí vzduchových bublin vakuem následuje odsávací rohož. Poslední vrstvou je pružná vakuovací fólie přilepená těsnícím tmelem pro zajištění funkce vakua. Využívá se relativně malého podtlaku v rozmezí 0,3 – 0,9 bar a vytvrzování probíhá při běžné teplotě. V případě prepregů se používají vyhřívané tunely nebo vytápěné komory pro dosažení předepsané vytvrzovací teploty. [5; 22]

Jako výztuž se využívají nejrůznější typy tkanin ze skleněných, uhlíkových aramidových vláken i jejich kombinace. Díky vakuu je možné prosycovat i tkaniny s vysokou gramáží. Pojivem jsou epoxidové nebo polyesterové pryskyřice. Výhodou oproti ručnímu kladení je dosažení kompozitu s vyšším obsahem výztuže a nižší emise těkavých látek a snadnější prosycování výztuže. Nevýhodou jsou vyšší náklady na proces a používání jednorázových materiálů. Míchání a obsah pryskyřice jsou stále závislé na dovednostech zpracovatele. [22; 24]

Technologie je vhodná pro malé až střední série a poskytuje kompozity s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Využívá se například pro výrobu kánoí a lopatek vesel. Sendvičové struktury se používají nejčastěji při stavbě lodí a konstrukci lyží. [17; 19; 22]

2.4.4.2. Lisování v autoklávu

Lisování v autoklávu je nejnákladnější a nejsložitější technologií pro sériovou výrobu velkorozměrných konstrukcí. Výchozí surovinou jsou vždy prepregy a vzniklé kompozity s obsahem výztuže přes 60 % se používají pro náročné aplikace, především v odvětvích letectví a kosmonautiky. Touto technologií jsou vyráběny i skořepiny vozů Formule 1. [5; 22]

Autoklávy jsou tlakové nádoby, které umožňují dosažení a regulaci požadovaných podmínek (teploty a tlaku) během výroby. Skladba vrstev je v podstatě stejná jako u lisování pomocí vakua a veškeré přípravy probíhají mimo autokláv. Po vložení formy pokryté pružnou fólií do vyhřívaného autoklávu se provede evakuace podtlakem (přibližně 0,8 bar) a následně se autokláv natlakuje na cca 6 bar. Zpracování prepregů vyžaduje zpracování při zvýšené teplotě. Používají se prepregy na bázi skleněných, uhlíkových a aramidových vláken v kombinaci s epoxidovou pryskyřicí. Pro letectví a kosmonautiku se využívají i borová vlákna. Lisováním v autoklávu se vyrábějí velmi kvalitní a drahé rámy špičkových závodních kol. [16; 22; 24]

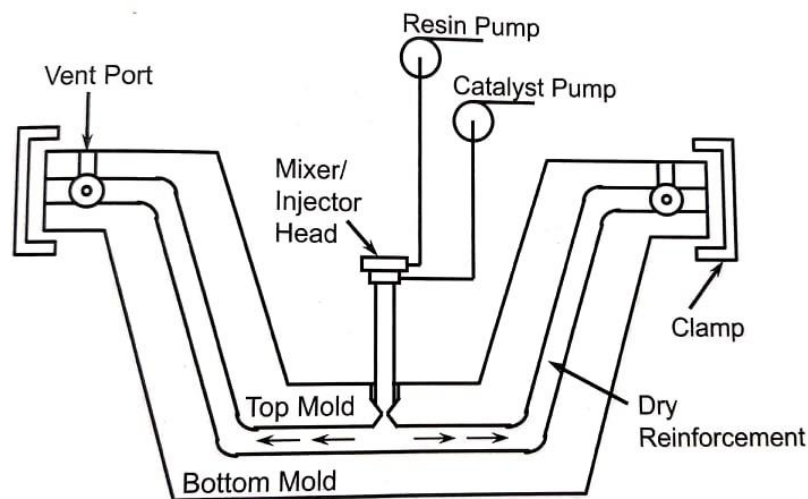
2.4.5. Injektážní a infuzní technologie

Injektážní a infuzní technologie se řadí do skupiny uzavřených technologií a jejich největší výhodou je redukce emisí zdraví škodlivých těkavých látek (např. styrenu). Všechny modifikace těchto technologií jsou tzv. „mokrými“ technologiemi, kdy je suchá výztuž prosycována pryskyřicí až ve formě pomocí injektáže, vakua nebo kombinací obou. Patří sem vysokotlaké vstřikování (RTM – resin transfer moulding), vakuo-injekční technologie (VARTM – vacuum assisted resin transfer moulding) a vakuové prosycování (VIP – vacuum infusion process). [22]

2.4.5.1. Vysokotlaké vstřikování

Technologie RTM (obrázek 30) je injektážní technologií poskytující kvalitní výlisky s nízkými základními investicemi. Používají se formy se vstupem pro zavedení pryskyřice

a výstupem pro únik vzduchu. Uzavřená forma robustní konstrukce je vyrobená z kovu nebo polymerbetonu (polymerbeton = vysoce plněná pryskyřice) a musí vydržet velké tlaky. Uvnitř formy opatřené gelcoatem je umístěná suchá výztuž, která je konstruována tak, aby usnadňovala snadný tok pryskyřice a bylo možné dosáhnout úplného prosycení výztuže v co nejkratším čase. Při velkosériové výrobě se do formy vkládají tzv. předlisky. Pryskyřice je injektážní pistolí pumpována do formy vstupním otvorem pod tlakem maximálně 5 barů, dokud není forma zcela plná. Dokončení procesu prosycování se pozná podle plniva vytékajícího kontrolními otvory. Pryskyřice je dávkována pomocí vysokotlaké pumpy současně s iniciátorem. Vytvrzovací reakce probíhá v rozmezí 10–20 minut a je využito teplo z exotermní reakce. Po vytvrzení se forma otevře a vyjme se finální výrobek. [5; 9; 22]



Obrázek 30: Vysokotlaké vstřikování (RTM) [5]

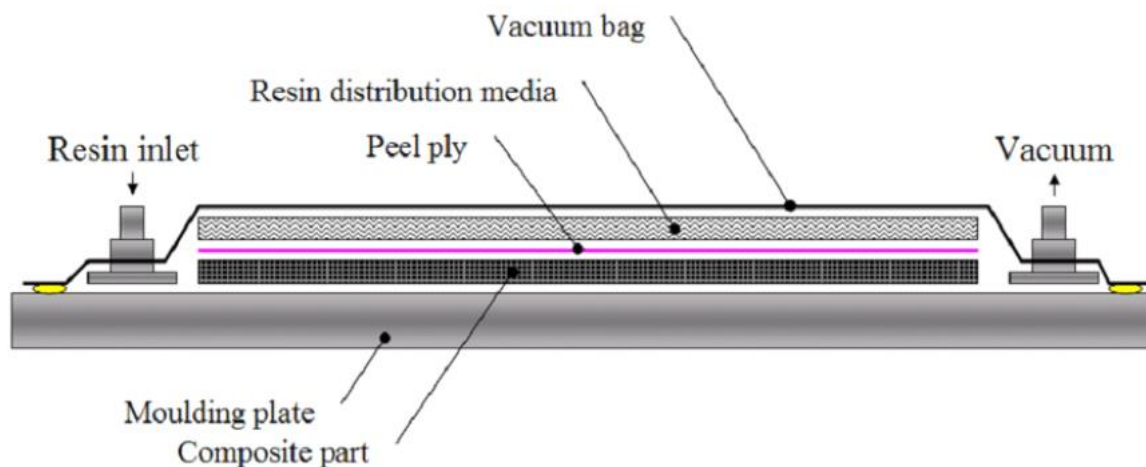
Výztuži jsou rohože o nižší gramáži, nejčastěji na bázi skleněných vláken. Jako pojivo se používají nejčastěji polyesterové pryskyřice v kombinaci s urychlovači a případně s plnivem, které snižují náklady nebo upravují určité vlastnosti výsledného kompozitu. Technologii vysokotlakového vstřikování je možné vyrábět kompozity komplikovaných tvarů v relativně krátkých zpracovatelských cyklech a reprodukovatelné kvalitě. Tato technologie je vhodná pro sériovou výrobu v řádu stovek až tisíců kusů. Pořizovací cena výrobního zařízení je vysoká. Může dojít k nedokonalému prosycení výztuže a vzniku velkého množství odpadu. Kompozity vyrobené vysokotlakým vstřikováním nachází uplatnění především v automobilovém průmyslu na výrobu karoserií. Ze sportovního náčiní se touto technologií vyrábějí například rámy jízdních kol, kajaky, skateboardy či surfovací prkna. [5; 22; 23; 24; 25]

2.4.5.2. Vakuo-injekční technologie

Technologie VARTM je modifikací technologie RTM, kdy je prosycování urychlené vakuem. Díky nižším tlakům (0,4 – 1 bar) nejsou potřeba tak robustní formy a je možné vyrábět větší dílce. Pro výrobu sendvičových struktur je možné použít určité typy pěnových jader, dostatečně pevných, aby odolala působícímu tlaku. Voštiny použít nelze, protože by se buňky zaplnily pryskyřicí. Touto technologií se vyrábějí velké dílce a konkrétním příkladem je výroba trupů lodí. [5; 22]

2.4.5.3. Vakuové prosycování

Vakuové prosycování (obrázek 31) je výrobní technologie vhodná pro menší až střední série a využívá se především pro výrobu velkorozměrových dílců a sendvičových struktur. Nepoužívá se injekční zařízení, protože pryskyřice je nasávána do formy podtlakem. Využívají se 3 modifikace vakuového prosycování: s pružnou vrchní částí formy, pod pružnou fólií a metoda SCRIMP (SCRIMP = Seemann composites resin infusion moulding process). [22; 23]



Obrázek 31: Vakuové prosycování [26]

Vakuové prosycování pod pružnou fólií nese podobné rysy jako technologie lisování pomocí vakua. Používají se spodní formy stejného typu jako při ručním kladení a místo vrchního dílu formy se používá pružná fólie. Vrstvy výztuže se naskládají do formy, přikryjí se fólií, která je připevněná těsnícími pásky. Na rozdíl od ručního kladení nedochází k prosycování výztuže vrstvu po vrstvě, ale celý proces prosycování probíhá najednou. Iniciovaná pryskyřice je do formy vtažená pomocí vakua. Touto technologií je možné vyrábět i sendvičové struktury

v jednom kroku, bez potřeby dalšího lepení. V případě velkorozměrných dílců je pryskyřice do vzdálenějších míst rozváděna perforovanými trubičkami. Po finálním vytvrzení je možné vyjmout hotový výrobek z formy. Metoda SCRIMP je velmi podobná, pouze distribuce pryskyřice je zajišťována speciální sít'kou umístěnou po celém povrchu suché výztuže. [22; 23; 27]

Výztuží jsou tkaniny různého druhu a gramáže na bázi skleněných, uhlíkových a aramidových vláken a jejich kombinací. Je možné vkládat různá jádra – pěny a voštiny. Pryskyřice musí mít dlouhou dobu zpracovatelnosti kvůli dlouhé době prosycování při výrobě velkorozměrných dílců. Používají se nenasyčené polyesterové a epoxidové nízkoviskózní pryskyřice. Vakuové prosycování umožňuje výrobu velmi rozměrných kompozitních výrobků, kde by ruční laminování bylo příliš pracné a lisování nebo vysokotlaké vstřikování příliš nákladné. Typickými produkty jsou jachty, katamarány, záchranné čluny, dílce pro kapotáž lokomotiv a vagónů nebo lopatky větrných elektráren. [10; 22; 23; 27]

2.5. Sportovní aplikace kompozitních materiálů

Konstrukce moderních kompozitních materiálů ve sportu se používá déle než 100 let. Pravděpodobně prvním kompozitem pro sportovní užití byla papírová kánoe vyrobená v roce 1874 společností E. Waters & Sons v New Yorku. [19]

S rozvojem ekonomiky se životní úroveň lidí zvyšuje a ti tráví stále více času sportem. Velký význam má právě proto neustálé zlepšování a vývoj sportovního náčiní. Původní materiály, jako jsou dřevo, ocel, hliníkové slitiny byly nahrazeny kompozitními materiály, a to z několika následujících důvodů. Kompozitní materiály jsou lehké. Hmotnost hraje velmi důležitou roli, protože čím je náčiní lehčí, tím menší úsilí musí sportovec vynaložit během sportovního výkonu. Mají dobré mechanické vlastnosti, které jsou základem pro vznik kvalitního sportovního náčiní. Důležitou roli hraje také design. Široká škála zpracovatelských technologií umožňuje kompozitům oproti tradičním materiálům výběr té nejvhodnější pro danou aplikaci a vznik v podstatě jakéhokoli produktu přesně žádaného tvaru, barvy a potřebných vlastností. [28]

2.5.1. Cyklistika

Závodní cyklistika je jeden z nejnáročnějších sportů a vyžaduje tvrdý trénink, vytrvalost, strategii a kvalitní vybavení. Závodní cyklisté dosahují rychlostí blízkých 80 km/h. Je vyžadováno velké soustředění a rovnoměrný přenos sil do pedálů oběma nohama po celou otáčku kliky. Žádná energie nesmí být vyplýtvána na zbytečné pohyby. A proto hraje u vrcholových závodníků tak důležitou roli i hmotnost kola. Karbonové rámy závodních kol jsou tužší než ocel a lehčí než hliník. Kromě špičkových závodních strojů jsou dnes karbonová kola běžná i ve výkonnostní cyklistice, a dokonce i u amatérských jezdců. Závodní kola jsou vyrobena z dražších a kvalitnějších materiálů s lepšími mechanickými vlastnostmi než kola pro amatérské sportovce. [19; 29]

Rámy jízdních kol

Rámy jízdních kol se nejčastěji vyrábí z karbonových vláken ve formě prepregů v kombinaci s epoxidovou pryskyřicí. Někteří výrobci používají modifikovanou pryskyřici pro zlepšení vlastností. Příkladem takové modifikace může být epoxidová pryskyřice plněná skleněnými nebo uhlíkovými nanotrubičkami, případně aramidy, které zvyšují odolnost vůči nárazu. Používají se různé druhy prepregů – jednosměrné i tkaniny. Jednosměrné prepregy mají

potřebné vlastnosti v jednom směru a snadno se ukládají pod stanovenými úhly. Tkaná textilie se používá na složitých místech geometrie a na místech, kde není zatížení materiálu přesně definováno nebo kde se vrtají do rámu různé otvory. Výsledné mechanické vlastnosti rámu jsou dány druhem, uložením a orientací jednotlivých vrstev uhlíkových vláken. Nejlepší výrobci vycházejí z mnohaletých zkušeností, řady výpočtů a mechanických zkoušek a design neustále vylepšují, což vyžaduje celý tým designerů a inženýrů. [30; 31]

Z prepregu jsou pomocí CNC stroje vyřezány jednotlivé části materiálu tak, aby vzniklo co nejméně odpadu. Na jeden rám jich je použito kolem 400 kusů. Takto připravené kusy materiálu se v přesně daném pořadí a orientaci ručně kladou na formy. Předpřipravený rám je vložen do ocelové negativní formy a vytvrzen za vysoké teploty a tlaku. Rám je vyroben jako celek v jedné formě a jedná se o nejčastěji používanou konstrukci – **konstrukci monokokovou** (obrázek 32). Konkrétně kvůli složitosti tvaru se zvlášť vyrábí hlavní část rámu sestávající z horní, spodní a sedlové trubky a zadní stavba rámu, které se spojují dodatečně. Po vychladnutí a vyjmutí rámu z formy je potřeba odstranit přebytečnou pryskyřici ze švu a probíhají povrchové úpravy, nanáší se barva, obtisky a čirý lak. [30; 31; 32]



Obrázek 32: Silniční kolo s monokokovou konstrukcí rámu [30]

Z použití prepregu a forem vychází i **konstrukce lepených trubek** (obrázek 33). Trubky se vyrábí zvlášť a spojují se do tvaru rámu. Spojky se obalují prepregem, prosycují pryskyřicí a vytvrzují. Tento typ konstrukce je vhodný zejména pro zákaznickou výrobu, kdy je možné vyrábět různé tvary rámu a monokoková konstrukce by byla extrémně náročná a drahá. [31; 32]



Obrázek 33: Konstrukce lepených trubek [31]

Konstrukce s použitím rámových spojek (obrázek 34) se od předchozích dvou konstrukcí liší. Nevychází z prepregu, ale trubky jsou vyrobeny technologií navíjení nebo vysokotlakým vstřikováním a spojeny pomocí rámových spojek. Výrobní technologie jsou automatizované a výroba je proto levnější. Mechanické vlastnosti rámu závisí na kvalitě spojů. [31; 32]



Obrázek 34: Konstrukce s použitím rámových spojek [33]

2.5.2. Lyžování

Světový rekord v rychlostním lyžování je téměř 255 km/h. Závodníci zcela běžně dosahují rychlostí přes 100 km/h. K podání takových výkonů jsou velmi pevné a lehké lyže nezbytné. Materiál musí být naprosto v pořádku, aby se na něj mohl závodník spolehnout. Stejně podmínky platí samozřejmě také v ostatních disciplínách, jako jsou například skoky a běh na lyžích, nebo akrobatické lyžování. S neustálým vývojem materiálů se kvalitní

kompozity dostávají mezi širokou veřejnost. Bez kompozitních struktur by dnes výroba lyží nebyla možná, protože právě ty nejvíce ovlivňují tuhost, odolnost a životnost lyží. [19; 34; 35]

Lyže

Lyže (obrázek 35) se skládají z jádra, vnějšího materiálu, skluznice a hran. Podle typu lyží a požadovaných vlastností se liší jejich složení. Musí mít dobrou podélnou torzní tuhost, aby umožnily dobré rozložení hmotnosti a tlaku a zároveň musí být dostatečně pružné, aby reagovaly na vlastnosti povrchu a tlumily vibrace, které by mohly vést k poranění kyčlí a kolen. Neexistují univerzální lyže, které by byly vhodné pro všechny úrovně lyžaře a podmínky. Většina rekreačních modelů volí kompromis a je konstruována tak, aby vyhovovala co nejvíce lidem a podmínkám. Pro závodní lyžaře jsou lyže vyráběny přímo na míru. [36; 37]

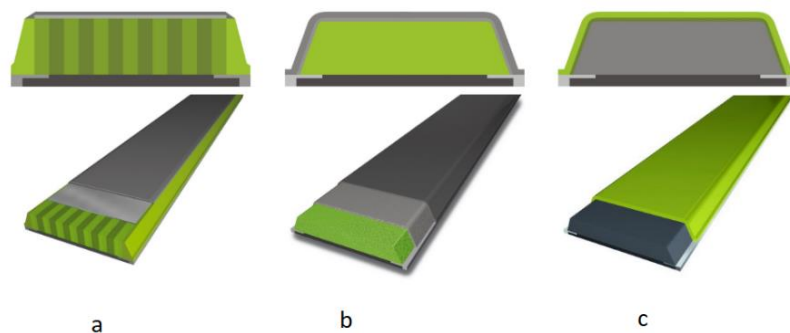
Jádro udává hmotnost, sílu a tuhost lyže a je vyrobené z různých materiálů. Využívají se lehká dřeva (topol, osika, jedle) i tvrdá dřeva (jasan, buk, akát, bambus). Výhodou dřeva je dlouhá životnost a velmi dynamická konstrukce, kdy se po zatížení a následném odlehčení ihned vrací do výchozí polohy. Dobře tlumí vibrace a nárazy. Pěnové jádro bylo poprvé použito v 70. letech 20. století. Je levnější a lehčí než dřevo a lépe tlumí nárazy. Navíc se snáze zpracovává. Většina pěnových jader je na bázi polyuretanu. Třetím materiálem pro výrobu jader je hliník, který se používá ve formě voštiny. Tato jádra jsou lehká, mají vynikající pevnost v tahu a jsou pružnější než dřevo. Vnější část lyží je vyrobená z epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými nebo skleněnými vlákny. Do některých konstrukcí se přidávají také aramidová vlákna. Skluznice je vyrobená z polyethylenu a používají se 3 typy skluznic: extrudované, spěkané a grafitové. Liší se vlastnostmi a cenou a v tomto pořadí jsou seřazeny od nejlevnějšího typu po nejdražší. [19; 35; 38; 39]



Obrázek 35: Sjezdové lyže s dřevěným jádrem vyztužené uhlíkovými vlákny [40]

Při výrobě se používají různé druhy konstrukcí (obrázek 36). **Sendvičová konstrukce** využívá dřevěné jádro. Veškeré součásti lyže se složí do formy a za určitého tlaku a teploty se vytvrdí. U **polyuretanové konstrukce (PUR)** se do formy vkládá spodní a horní vrstva lyže,

skluznice a hrany a poté je polyuretan do formy vstřikován tlakem. Tento typ levné a rychlé konstrukce je vhodný spíše pro děti a začátečníky. Nejznámější konstrukcí v lyžařském průmyslu je **konstrukce CAP**. Boky a skořepina lyže se spojí do jednoho nosného dílu, do kterého se vloží zvolené jádro. Spodní vrstva a skluznice se lepí pod tlakem. V případě samonosného jádra z různých dřevěných, hliníkových a karbonových laminátů slouží slupka pouze jako uzavírající vrchní vrstva. Uzavřená konstrukce absorbuje nárazy jako celek, má skvělé jízdní vlastnosti a dlouhou životnost. Často jsou využívány různé hybridní konstrukce. Na závěr probíhají finální úpravy, kdy se lyže brousí, leští a probíhá kontrola kvality. [38; 39]



Obrázek 36: Konstrukce lyží: a – sendvičová konstrukce, b – PUR konstrukce, c – konstrukce CAP [38]

Lyžařské hůlky

Lyžařské hůlky je možné vyrábět pultruzí, navíjením či lepením prepregů v různých směrech. Používají se skleněná i uhlíková vlákna a epoxidová pryskyřice. [19]

2.5.3. Veslování

Veslování má velmi dlouhou historii a první záznamy jsou již z dob faraónů. Moderní veslařský sport se zrodil v Anglii na začátku 18. století, kdy se začaly pořádat závody o ceny a roku 1829 se uskutečnil první, dodnes populární, závod osmiveslic mezi univerzitami Oxford a Cambridge. První závodní veslice byly vyrobeny ze dřeva, hlavně cedrového a vyráběly se déle než 100 let, až do vynálezu kompozitů. První soutěž mezi kompozitními loděmi proběhla v roce 1972 na olympijských hrách v Mnichově. [17; 41]

Veslařské lodě

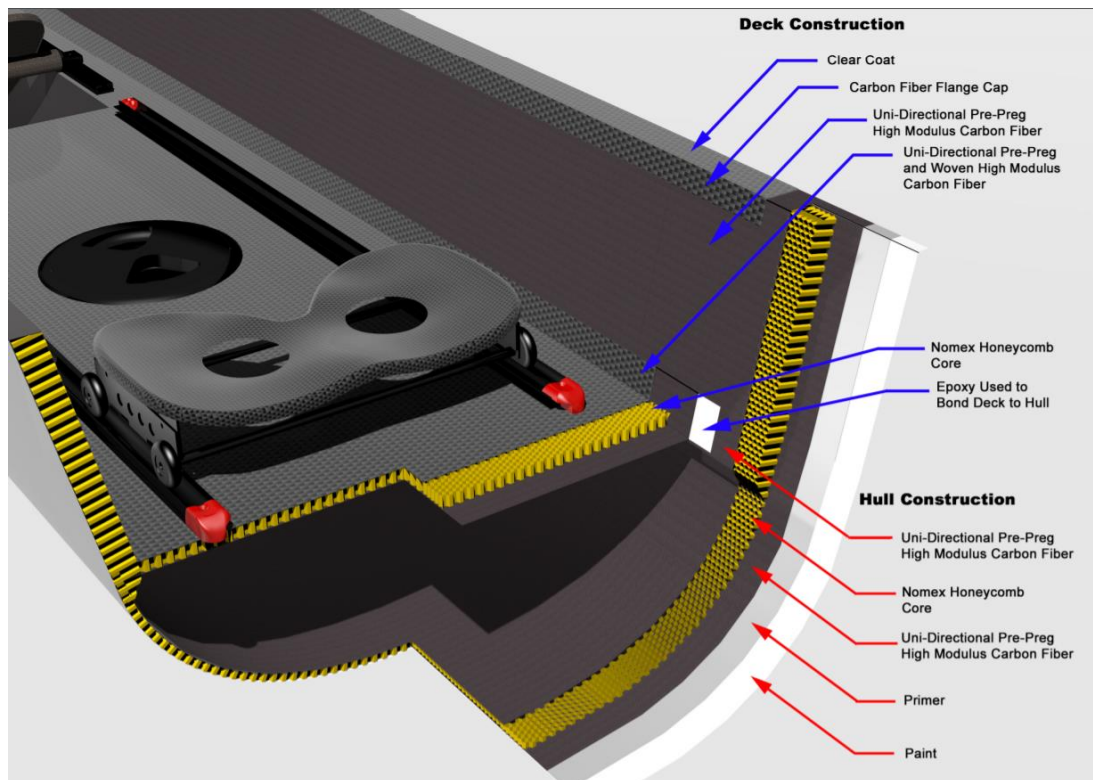
Závodní veslařské lodě (obrázek 37) jsou vyrobeny z uhlíkových vláken s epoxidovou pryskyřicí, někdy v kombinaci s aramidovými či skleněnými vlákny. Jsou velmi lehké,

ale poměrně křehké a drahé. Levnější lodě používané pro trénink v oddílech jsou z vláken skleněných s nenasycenou polyesterovou nebo vinylesterovou pryskyřicí. Jejich hmotnost je sice o něco vyšší, ale jsou odolnější vůči nárazům v průběhu manipulace. Jako materiál pro jádra se nejčastěji volí kevlarové voštiny. Občas se používají pěny, které mají vyšší rázovou houževnatost, ale také vyšší hmotnost. Existují různé typy lodí. Podle počtu lidí v posádce se vyrábí lodě buď pro jednoho člověka nebo pro posádku dvou, čtyř či osmi lidí. Dělají se lodě s kormidelníkem i bez. Bere se také v potaz průměrná hmotnost posádky a podle toho jsou lodě konstruovány pro kategorie lehkých nebo těžkých vah. [17; 18]



Obrázek 37: Závodní skif vyztužený uhlíkovými vlákny [18]

Veslařské lodě je možné vyrábět ručním kladením za mokra, které se používá pro výrobu většiny lodí. Do formy je nanесena separační vrstva, gelcoat a postupně jsou kladeny vrstvy výztuže, které jsou prosycovány pryskyřicí. Vytvrzování probíhá za pokojové teploty a následuje postupné dotvrzování při vyšších teplotách až do teploty 100 °C. Nejpokrokovější technologií je prepregová technologie. S prepregy se velmi dobře pracuje, práce je ve srovnání s ručním kladením čistší a vlákna obsahují přesně dané množství pryskyřice. Pro dosažení vhodných mechanických vlastností se vrstvy kladou pod různými úhly. Vytvrzování probíhá při teplotách okolo 120 °C v pecích nebo v autoklávech. Prepregovou technologií se vyrábějí závodní lodě s předepsanou hmotností. Konstrukce lodi vyrobené touto technologií je znázorněna na obrázku 38. [17; 18; 42]



Obrázek 38: Konstrukce lodi vyrobené prepregovou technologií [18]

Vesla

Ve veslování se používají 2 typy vesel – párová a nepárová. Nejčastějším materiálem je kombinace uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice. Pačina vesla (obrázek 39) se vyrábí buď navíjením nebo ručním kladením velmi kvalitních vrstev prepregu pod různými úhly. Lopatky vesel se lisují za pomoci vakua. [43; 44]



Obrázek 39: Pačiny vesel vyztužené uhlíkovými vlákny s aramidovými pásky [44]

2.5.4. Další sportovní vybavení

Kompozitní materiály nacházejí uplatnění ve velmi širokém spektru sportovních aplikací. V dnešní době by bez nich sport již ani nemohl existovat. Kromě výše zmíněných aplikací bude v této podkapitole zmíněn krátký průřez dalších možností sportovních aplikací.

Rybářské pruty

Pro sportovní rybolov je vhodný lehký rybářský prut, který umožní nahození s výdejem co nejmenšího množství energie. Rybářský prut vyrobený ze skleněných vláken s matricí z epoxidové pryskyřice je lehký a pružný. Vyrábí se kombinací technologií pultruze a navíjení. Nižší hmotnosti je možné dosáhnout použitím uhlíkových vláken místo skleněných. U prutu vyztuženého uhlíkovými vlákny se navíc vibrace při nahození tlumí rychleji, než tomu je u jiných materiálů, což umožňuje delší a přesnější nahození. Kombinací uhlíkových vláken vinutých do spirály pokrytých skleněnými vlákny orientovaných podélně podél osy prutu s epoxidovou pryskyřicí vzniká prut (obrázek 40) s vhodnými vlastnostmi pro sportovní rybolov, protože je velmi lehký a je možné ho ohnout až o 360°, aniž by došlo k jeho poškození. [19]



Obrázek 40: Rybářský prut vyztužený uhlíkovými vlákny [45]

Kánoe a kajaky

Používají se skleněná, uhlíková i aramidová vlákna v kombinaci s epoxidovou pryskyřicí. Při konstrukci je potřeba volit materiály, které jsou lehké, houževnaté a bezpečné. Pro vyšší pevnost v tahu a odolnost proti oděru je možné do kánoí přidat speciální materiál zvaný Spheretex. Jedná se o tkaninu s vysokým obsahem křemičitého skla. Lisováním

aramidových vláken nasycených vinylesterovou pryskyřicí za pomoci vakua vznikají tenkostěnné kánoe s vysokým poměrem obsahu výztuže k matici, které jsou pružné a odolné. Pro výztuž kompozitních kajaků se používají velmi lehká a pevná polyethylenová vlákna. Kajak je konstruován tak, aby konce lodi byly lehčí a umožňovaly tak snazší průjezd vlnami. [19; 36]

Windsurfová prkna

Prkna pro windsurfing (obrázek 41) jsou tvořena sendvičovou strukturou. Pro výrobu se používá jádro z polyvinylchloridové pěny s vysokou hustotou mezi vrstvami skleněné výztuže s epoxidovou pryskyřicí. Sendvičová struktura je obalená lehčím (zpěňovatelným) polystyrenem. Celá struktura se vytvrzuje ve formě za tepla a tlaku za vzniku velmi lehkých a pevných windsurfových prken. [19; 36]



Obrázek 41: Windsurfové prkno [46]

Snowboardy

Základem snowboardu je sendvičová struktura složená z polyurethanového jádra a skleněných, uhlíkových nebo hybridních prepregů, vrchní ochrannou vrstvou z termoplastu a polyethylenovou skluznicí. Vyrábí se vakuo-injekční technologií. [19; 47]



Obrázek 42: Snowboard vyztužený uhlíkovými vlákny [47]

Hokejky

Hokejka (obrázek 43) musí být lehká a tvrdá. Průměrná životnost hokejky je 5–15 zápasů, protože je vystavená tvrdým nárazům do ledu, mantinelů a různě ohýbána při střetu hráčů. Rukojeti hokejek mohou být vyrobeny z osikového dřeva obaleného výztuží ze skleněných vláken, která snižuje hmotnost a zvyšuje pevnost kompozitu. Čepel je vyztužená z 80 % skleněnými vlákny, doplněných 20 % uhlíkových vláken pro zlepšení tuhosti. Někdy se kvůli nárazům může přidávat aramidová výztuž. [19; 36]



Obrázek 43: Kompozitní hokejka vyztužená uhlíkovými vlákny [47]

Závodní saně a boby

Závodní saně a boby (obrázek 44) jsou náčiním využívaným pro zimní sport, ve kterém mají závodníci za úkol projet dráhu v ledovém korytě v co nejkratším čase. Výsledný čas je ovlivněn celkem třemi faktory, a to co nejrychlejším startem, zkušenostmi pilota a materiálem saní. Závodníci dosahují na trati rychlostí přes 140 km/h. Kompozitní boby jsou oproti původním ocelovým čtyřikrát pevnější a hlavně bezpečnější, protože je závodník chráněn skořepinou. Sendvičová struktura bobů se skládá z Nomexové voštiny obložené aramidovou a uhlíkovou výztuží s epoxidovou pryskyřicí, která vydrží teploty pod nulou, aniž by ztrácela adhezivní vlastnosti. [19; 34]



Obrázek 44: Český dvojbob na trati v Soči [34]

Lední brusle

Příkladem výroby lehkých kompozitních bruslí je nízkonákladová technologie s vysokým objemem produkce, kdy je 90 % původního materiálu (kůže) v botách nahrazeno hybridním kompozitem na bázi skleněných a uhlíkových vláken. Kromě nižší hmotnosti jsou kompozitní brusle také díky vyšší tuhosti lépe ovladatelné. Krasobruslení je kombinací technické náročnosti a estetického dojmu a kvalitní brusle mohou výrazně pomoci dobrému výsledku. Lehké a tuhé brusle umožňují závodníkovi lépe provádět vyšší skoky a piruety a mít lepší kontrolu při dopadu ostří na led. [19; 34]

Golfové hole

Klíčem k úspěchu v golfu není pouze síla, ale hlavně kontrola. Kompozitní vrchní část golfové hole vyztužené uhlíkovými vlákny umožňuje golfistovi lepší ovladatelnost. Je o 40 % lehčí než kovová, což umožňuje přidat hmotnost navíc na spodní části, a to stále při celkové nižší hmotnosti. Lehčí golfová hůl napomáhá zvýšit přesnost rány golfisty a těžší spodní část hole podporuje delší dostřel míčku. Někdy se přidávají i borová vlákna kvůli vyšší tuhosti. Vrchní část golfových holí se vyrábí navíjením. [19]

Tenisové rakety

Profesionální tenisté dokážou odpálit tenisový míček rychlostí až 160 km/h. O výsledku hry rozhoduje rychlost a přesnost. Tenisové rakety (obrázek 45) vyztužené uhlíkovými vlákny jsou lehčí a ovladatelnější, než rakety z kovu či dřeva, a hlavně nedochází k tak velkým deformacím v podobě krutu. Krutu se zabrání použitím pletených uhlíkových vláken. Dochází k menším energetickým ztrátám a veškerá energie je dána do rychlosti míčku. Rukojeť se vyrábí kladením vyztužujících vrstev na pěnové jádro. Životnost kompozitních raket je delší, než u jiných materiálů a je možné je vyrobit podle potřeb sportovce přímo na míru. Příkladem poměru složení vyztuže může být 65 % uhlík, 30 % sklo a 5 % aramid. Uhlík je pevný, ale křehčí, sklo pružnější a houževnatější. Aramid dobře odolává nárazům. [19; 36]



Obrázek 45: Kompozitní tenisová raketa [48]

Basebalové pálky

Basebalové pálky vyrobené ze směsi polykarbonátu s uhlíkovými vlákny jsou lehké, odolné jako hliník se stejným zvukem, jako by byly vyrobeny ze dřeva. Musí být extrémně odolné proti nárazu. Při testech mechanických vlastností jsou testovány na náraz míčku při rychlosti 290 km/h. Vrstvy výztuže jsou skládány pod různými úhly na trn (formu) nebo na permanentní pěnové jádro. Použití trnu je výhodnější, protože je možné použít vyšší vytvrzovací teploty, aniž by došlo k poškození jádra. Po vytvrzení se trn vyjme, přidělá se rukojeť a vrchní kryt pálky. Malým otvorem v horní části se pod tlakem aplikuje polyuretanová pěna, která umožňuje deformaci pálky při nárazu míčku. [19; 49]

Přilby a chrániče

Nejrůznější přilby a chrániče můžeme nalézt v celé řadě sportů a některé z nich jsou z kompozitních materiálů. Příkladem výroby přilby může být ruční kladení vrstev výztuže na bázi uhlíku a skla proycovaných epoxidovou pryskyřicí. Příklad chráničů je znázorněn na obrázku 46. Jedná se o šlachovky vyztužené karbonovými vlákny, které se používají v jezdectví pro ochranu nohou koní proti zašlápnutí. [50; 51]



Obrázek 46: Šlachovka vyztužená karbonovými vlákny [51]

3. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá tématem sportovních aplikací kompozitních materiálů a skládá se z pěti hlavních částí. První část je zaměřena na obecnou teorii kompozitního materiálu, stručnou historii a jeho vlastnosti. Druhá část pojednává o polymerních matricích, základním dělení, vlastnostech, výhodách a nevýhodách se zaměřením se na reaktoplastické matrice. Ve třetí části se řeší výztuže, a to jak z hlediska materiálu, tak z hlediska geometrického uspořádání v kompozitech. Vzhledem k tématu práce se kapitola zabývá především vláknovými výztužemi. Čtvrtá část popisuje postupy, vlastnosti, výhody a nevýhody vybraných technologií výroby používaných pro výrobu sportovního náčiní. Poslední část literární rešerše obsahuje stručný výčet sportovních aktivit, při kterých se využívají kompozitní materiály. Podrobněji se zabývá pouze cyklistikou, lyžováním a veslováním, neboť využití kompozitních materiálů je v oblasti celého sportu velmi široké.

V kompozitních materiálech se uplatňuje synergický efekt, kdy je dosaženo lepších vlastností, než kterých by bylo možné dosáhnout pouhou sumací požadovaných vlastností jednotlivých složek. Ve sportovních aplikacích nachází tyto materiály místo, protože jsou lehké, mají výborné mechanické vlastnosti a existuje mnoho možností jejich zpracování. Je tedy možné vyrobit kompozit s předem určenými vlastnostmi tzv. „na míru“.

Nejčastěji používaným materiálem pro matrice ve sportovním náčiní jsou epoxidové pryskyřice, a to v kombinaci s uhlíkovými vlákny. Dále se jako matrice využívají nenasycené polyesterové a vinylesterové pryskyřice. Pro výztuž se kromě uhlíkových vláken používají také vlákna skleněná, aramidová, borová a jejich kombinace. Technologie zpracování se volí podle mnoha aspektů, jako je například velikost dílce, sériovost výroby, cena, zpracovávané materiály či požadované vlastnosti. Bylo by tedy chybou se domnívat, že nejdražší materiály zaručují nejlepší vlastnosti výrobku. Každý materiál má své přednosti a opravdovým uměním materiálových inženýrů je zvolit tu nejlepší kombinaci pro danou aplikaci. Kromě materiálů hraje velmi významnou roli samotný design, který se neustále vyvíjí. Každý rok vznikají nové modely sportovního náčiní, ve kterých se výrobci snaží eliminovat předchozí nedostatky. Je to právě tvrdá konkurence, která žene vývoj sportovních materiálů kupředu. A ti nejlepší mají možnost být součástí nejprestižnějších závodů a soutěží a překonávat světové rekordy.

Cílem této literární rešerše bylo vytvořit přehled matric, výztuží a technologií výroby běžně používaných pro sportovní aplikace. Popsat jejich vlastnosti, výhody a nevýhody tak, aby bylo možné navázat samotným výčtem sportovních aktivit, při kterých se kompozitní

materiály využívají. Vzhledem k širokému zaměření práce se u jednotlivých aplikací jedná o příklady možných výrob a voleb materiálů. Práce by měla ukázat, jak důležitou roli hrají kompozitní materiály v našich životech a v jakých možných sportech nachází uplatnění.

4. LITERATURA

- [1] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. 1. vydání. Brno: Technický dozorčí spolek Brno – Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.
- [2] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] VERHOEVEN, John D.; PENDRAY, A. H.; DAUKSCH, W.E. *The key role of impurities in ancient damascus steel blades*. JOM [online]. 1998. [cit. 2020-02-17]. 50, 58–64. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11837-998-0419-y>.
- [4] GAY, Daniel; HOA, Suong V. *Composite materials – design and applications*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. ISBN 978-1-4200-4519-2.
- [5] BARBERO, Ever J. *Introduction to composite materials design*. 2nd ed. Boca Raton: FL: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4200-7915-9.
- [6] MILTON, Graeme Walter. *The Theory of Composites*, Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [7] Military Handbook, MIL – HDBK – 17. *Composite Materials Handbook*, vol. 1–5, Washington, 1997.
- [8] VARGA, Zsolt; FILIPCSEI, Genovéva; ZRÍNYI, Miklós. *Smart composites with controlled anisotropy*. ELSEVIER [online]. 2005. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.03.102>.
- [9] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [10] ÅSTRÖM, Tomas B. *Manufacturing of polymer composites*. 1st ed. Boca Raton: FL: CRC Press, 1997. ISBN 978-1-138-45958-8.
- [11] BIRON, Michel. *Thermoplastics and thermoplastics composites*. 3rd ed. Cambridge: William Andrew, 2018. ISBN 978-0-08-102501-7.
- [12] BÉLAND, Sylvie. *High performance thermoplastics resins and their composites*. Park Ridge: William Andrew Publishing, 1990. ISBN 0-8155-1278-3.
- [13] WANG, Ru-Min; ZHENG, Shui-Rong; ZHENG, Ya-Ping. *Polymer matrix composites and technology – Front matter*. Oxford: Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978-0-85709-221-2.
- [14] ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Makromolekulární chemie: Úvod do chemie a technologie polymerů*. 3. vydání. Pardubice: Univerzita Pardubice – Fakulta chemicko-technologická, 2014. ISBN 978-80-7395-761-2.
- [15] MLEZIVA, Josef; ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Polymery: Výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vydání. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.

- [16] BUSCHOW, K. H. Jürgen; CAHN, Robert W.; FLEMINGS, Merton C.; ILSCHNER, Bernard; KRAMER, Edward J.; MAHAJAN, Subhash. *Encyclopedia of materials: Science and technology*, volume 1-11. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [17] SUBIC, Aleksandar. *Materials in sport equipment*. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. ISBN 978-0-08-102582-6.
- [18] Wintech Racing. [online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://wintechracing.com>.
- [19] MIRACLE, Daniel B.; DONALDSON, Steven L. *Sports and recreation equipment applications*. ASM Handbook, vol. 21: Composites [online]. 2001. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v21.9781627081955>.
- [20] WANG, Zhuo; SUN, Miao Miao; LI, Dong. *The applied research of new type fiber material on the manufacture of sports equipment*. Advanced materials research, vol. 583 [online]. 2012. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.583.322>.
- [21] FAZZOLARI, Fiorenzo A. *Sandwich Structures – Stability and vibrations of thin walled composite structures*. Woodhead Publishing [online]. 2017. [cit. 2020-05-17]. 49-90. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100410-4.00002-8>.
- [22] Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz>.
- [23] Aliancys. [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://aliancys.com/en/home>.
- [24] NetComposites. [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://netcomposites.com>.
- [25] Technologie zpracování plastů [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/18.html>.
- [26] ResearchGate – *Vacuum infusion process*. [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Normal-procedure-for-vacuum-infusion-process-9_fig1_325017393.
- [27] Saertex. [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.saertex.com/en>.
- [28] ZHANG, Lei. *The application of composite fiber materials in sports equipment*. Atlantis Press [online]. 2015. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.2991/emim-15.2015.88>.
- [29] Scott-Sports – The Carbon Experts. [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://carbonexperts.scott-sports.com>.
- [30] Look. [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.lookcycle.com>.
- [31] Cyclingtips. [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://cyclingtips.com/2013/08/the-beauty-of-cycling>.
- [32] Velocite. [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.velocite-bikes.com>.
- [33] Supercycling.cz. [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://supercycling.cz>.

- [34] Český olympijský výbor. [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.olympic.cz>.
- [35] Snow.cz. [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://snow.cz>.
- [36] KUTZ, Myer. *Handbook of material selection*. New York: John Wiley & Sons, 2002. ISBN 0-471-35924-6.
- [37] MORTENSEN, Andreas. *Concise encyclopedia of composite materials*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-08-045126-8.
- [38] Wintersteiger. [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.wintersteiger.cz>.
- [39] How Products Are Made. [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://www.madehow.com>.
- [40] Fischer Sports. [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.fischersports.com>.
- [41] Český veslařský svaz. [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.veslo.cz>.
- [42] Roseman. [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.roseman.cz>.
- [43] Brača-Sport. [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://rowing.braca-sport.com>.
- [44] Empacher. [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.empacher.com>.
- [45] The Complete Angler. [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.completeangler.co.nz>.
- [46] Windsurfing Karlín. [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.windsurfingkarlin.cz>.
- [47] Salomon. [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.salomon.com>.
- [48] Tennis Warehouse. [online]. [cit. 2020-06-24]. <https://www.tennis-warehouse.com>.
- [49] The Baum Research & Development Company. *Composite baseball bat with cavittied core*. BAUM, Charles S. Michigan. U.S. Patent Documents. US005458330A. 1995-10-17.
- [50] HASTINGS, Dale. *Helmet shell structure*. California. U.S. Patent Documents. US005794271A. 1998-08-18.
- [51] Veredus. [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.veredus.com>.