



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VÝROBY SKLOLAMINÁTOVÉHO DÍLU

PRODUCTION TECHNOLOGY OF FIBERGLASS PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Stanislav Stojanov Nenov

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Bohumil Kandus

BRNO 2017

Místo tohoto listu bude vloženo zadání (oboustranně). Zadání musí být
vevázáno v obou vyhotoveních práce.

Do druhého výtisku bude vložena kopie.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na technologii výroby dílu ze sklolaminátu. Seznamuje s vlastnostmi kompozitních materiálů a jejich rozdělením dle geometrie výztuže, dle rozměrů výztuže, dle materiálu výztuže a materiálu matrice. V závěrečné části popisuje výrobní technologie a postup vzniku dílu od 3D dat po data a výkresy formy včetně tvorby technologického postupu.

Klíčová slova

kompozit, kompozitní materiál, výztuž, matrice, sklolaminát,

ABSTRACT

Diploma thesis is focused on production technology of the glass fibre polyester part. It introduces characteristics of the composite materials and their dividing by the reinforcement geometry, reinforcement dimensions, reinforcement material and matrix material. In the final chapters thesis describes production technologies and proces of launching new part from 3D data to data and drawings of the mould including creation of the technological process.

Key words

composite, composite material, reinforcement, matrix, glass fiber reinforced polyester,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NENOV, S.S. *Technologie výroby sklolaminátového dílu*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 51 s. 5 příloh. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Technologie výroby sklolaminátového dílu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.5.2017

Datum

Bc. Stanislav S. Nenov

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Bohumilu Kandusovi a kolegům ze zaměstnání za cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování diplomové práce. Děkuji také celé své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ.....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD	8
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	9
1.1 Rozdělení podle geometrie výztuže	11
1.1.1 Částicové kompozity	12
1.1.2 Vláknové kompozity	12
1.2 Rozdělení podle rozměru výztuže.....	14
1.2.1 Nanokompozity	14
1.2.2 Mikrokompozity	14
1.2.3 Makrokompozity	14
1.3 Rozdělení podle materiálu vláken.....	14
1.3.1 Skleněná vlákna	15
1.3.2 Uhlíková vlákna	17
1.3.3 Aramidová vlákna.....	18
1.3.4 Přírodní vlákna	19
1.3.5 Keramická vlákna	20
1.3.6 Kovová vlákna	20
1.3.7 Whiskery	21
1.4 Rozdělení podle materiálu matrice	22
1.4.1 Kompozity s polymerní matricí	22
1.4.2 Kompozity s kovovou matricí.....	28
1.4.3 Kompozity s keramickou matricí.....	30
1.5 Technologie výroby kompozitů	33
1.5.1 Ruční laminace	33
1.5.2 Stříkání.....	34
1.5.3 Resin transfer moulding (RTM)	35
1.5.4 Mokrý lisování	36
1.5.5 Sheet molding compound (SMC)	37
1.5.6 Reaction injection molding (RIM)	38
1.5.7 Pultruze	39
2 VÝROBA SKLOLAMINÁTOVÉHO DÍLU	41

2.1	Popis dílu.....	41
2.2	Posouzení vhodné výrobní technologie.....	41
2.2.1	SMC.....	42
2.2.2	RIM.....	42
2.2.3	RTM.....	43
2.2.4	Vyhodnocení variant.....	43
2.3	Výroba dílu.....	44
	ZÁVĚR.....	46
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	47
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	49
	SEZNAM PŘÍLOH.....	51

ÚVOD

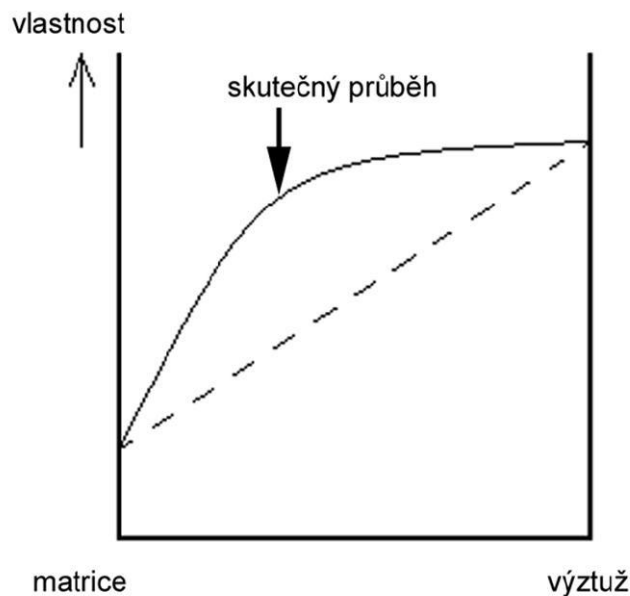
Kompozitní materiály nabízí široké možnosti použití v celé řadě průmyslových odvětví a disponují řadou výhod proti konvenčním materiálům – vyšší pevností, tuhostí, teplotní a chemickou odolností, odolností proti korozi a v neposlední řadě nízkou hmotností. Uplatňují se nejen pro méně náročné technické aplikace, ale i pro extrémně namáhané konstrukční prvky. Využívají se proto pro výrobu dílů v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu, v energetice, strojírenství, stavebnictví, pro výrobu sportovního náčiní, při stavbě lodí a člunů apod.

V dnešní době existuje nepřehledné množství vstupních surovin (matrice, výztuže, aditiva, atd.), které umožňují vytvořit kompozit mající vlastnosti požadované přímo danou aplikací. Stejně tak existuje velké množství výrobních technologií, kterými lze tyto materiály zpracovat a přetvořit do výsledného tvaru, v požadované kvalitě a přesnosti. Kompozity jsou materiálem budoucnosti a vývoj v této oblasti bude směřovat ke zlepšení mechanických, fyzikálních a chemických vlastností, k prozkoumávání nových výrobních technologií, ke snížení výrobní ceny a, v poslední době stále více diskutovaném, snížení dopadu na životní prostředí.

Jako dlouholetý zaměstnanec ve firmě vyrábějící díly z kompozitních materiálů bude mým cílem navázat na bakalářskou práci a detailněji popsat materiály, ze kterých se kompozity vyrábí, a možné výrobní technologie. Na konkrétním dílu pak bude popsán výrobní proces od návrhu modelu pro výrobu formy po vypracování technologického postupu.

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály (zkráceně kompozity) jsou heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází (složek) výrazně se lišících svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Spojitá fáze se nazývá matrice, nespojitou fází nazýváme výztuž. Výztuž má proti matrici výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost, apod.), avšak vlastnosti výsledného kompozitu jsou mnohem lepší než pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Takové chování materiálu se nazývá synergické (obr. 1.1) [1]. Synergismus lze definovat jako vzájemné působení několika složek materiálu, které vedou k zesílení účinku [2].



Obr. 1.1 Synergické chování kompozitu [1].

Aby bylo možné řadit vícesložkový materiál mezi kompozitní materiály, musí být splněny tyto podmínky:

- výztuž musí být zastoupena v objemovém podílu větším než 5 %,
- mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti výztuže a matrice se liší, výztuž má mnohem větší pevnost v tahu a je obvykle tužší než matrice,
- kompozitní materiál musí být připraven mísením složek [2].

Kompozitní materiál je možné také definovat jako kombinaci dvou nebo více materiálů, které se liší svým tvarem nebo složením. Jednotlivé složky nemění svou identitu, tj. mísením se neslučují, ani úplně nerozpouštějí. Mezi jednotlivými složkami existuje rozhraní a každou složku je možné fyzikálně identifikovat [3].

Složky kompozitu mohou být organického, anorganického nebo kovového původu ve formě částic, tyčí, vláken, destiček, pěn, apod. Předpokládá se, že průměrný rozměr největší jednotlivé homogenní geometrické částice v jednom směru je relativně malý v poměru k celkovému tělesu v tomtéž směru. Dále se předpokládá, že rozměry minoritní složky jsou dostatečně velké na to, aby zůstaly zachovány její charakteristické vlastnosti, jako kdyby byly přítomné v tělesu [4].

Vlastnosti kompozitních materiálů závisí na vlastnostech jednotlivých složek, jejich geometrii a rozložení fází. Jedním z nejdůležitějších parametrů je objemový (nebo hmotnostní) podíl výztuže, nebo též objemový podíl vláken. Čím vyšší je objemový podíl vláken, tím vyšší mechanické vlastnosti kompozit vykazuje. Rozložení výztuže určuje homogenitu nebo rovnoměrnost celého kompozitu. Čím nerovnoměrnější je rozložení výztuže, tím více je materiál heterogenní a tím větší je pravděpodobnost výskytu poruchy v nejslabších místech. Geometrie a orientace výztuže ovlivňují anizotropní chování celého systému [5].

Fáze kompozitních materiálů mají různé úlohy, které závisí na typu kompozitu a jeho aplikaci. Výztuž u nízko až středně výkonných kompozitů poskytuje celkové vyztužení, ale pouze místní zpevnění materiálu, naproti tomu matrice je hlavní nosnou složkou řídící mechanické vlastnosti materiálu. V případě vysoce výkonných kompozitů je výztuž páteří celého systému, která určuje jeho tuhost a pevnost ve směru vláken, zatímco matrice chrání citlivá vlákna a přenáší lokální namáhání z jednoho vlákna na ostatní [5].

Kompozitní materiály patří mezi termosety – během zpracování jejich složky reagují, aby vytvořily zesíťované struktury, nemohou být přetaveny a znovu zpracovány. Proti termoplastům, které mohou být znovu použity, odpad z termosetů musí být vyhozen nebo použit jako nízkonákladové plnivo do jiných produktů, nelze jej znovu zpracovat. V nevytvrzeném stavu mohou být kompozity zformovány do finálního tvaru s použitím nebo bez použití tlaku a mohou být zpolymerovány za použití chemikálií nebo tepla [6].

Kompozity mají ve srovnání s konvenčními materiály jedinečné vlastnosti, jejich hlavní výhody jsou:

- vysoká pevnost a tuhost,
- nízká hustota,
- dlouhou životnost,
- odolnost proti korozi,
- chemická odolnost,
- flexibilita tvarů a barev,
- vysoká rozměrová stálost,
- elektrická nevodivost,
- nízká tepelná vodivost [5, 7].

Jako nevýhody lze uvést:

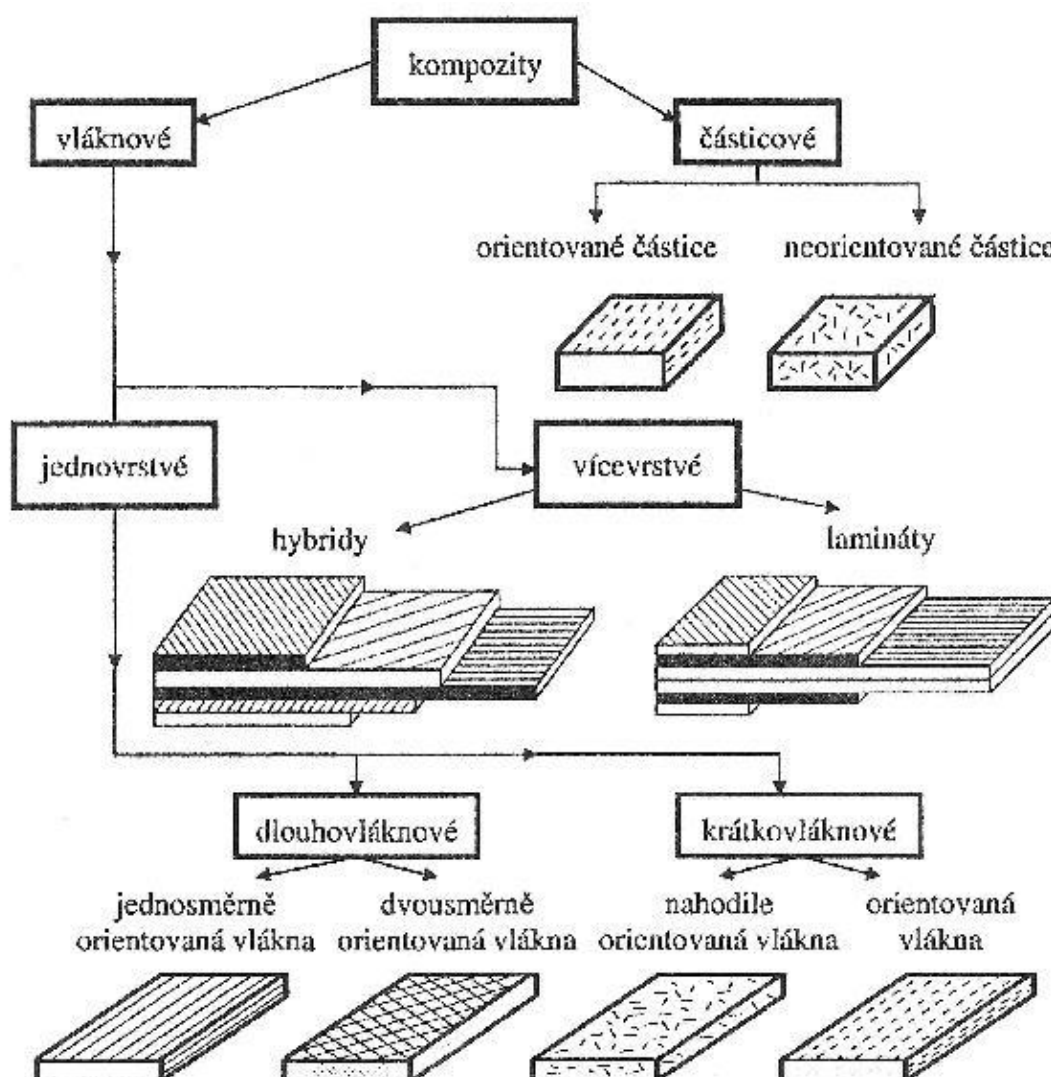
- nasákavost ve vlhkém prostředí,
- specifické (složitě) způsoby výroby,
- horší mechanické vlastnosti v kolmém směru k orientaci vláken,
- obtížně identifikovatelné a opravitelné poškození,
- obtížné nedestruktivní zkoušení materiálu [5, 8].

Kompozity, které jsou složené z nenasycených polyesterových pryskyřic (UP) a skleněných vláken, se nazývají sklolamináty (GRP – glass reinforced polyester). Vynikají nízkou hustotou (1500 až $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a v porovnání s kovovými materiály mají výhodu v odolnosti proti povětrným vlivům a různým chemikáliím, v propustnosti světla, izolaci tepla, zvuku a elektřiny. Sklolamináty lze běžně používat v rozsahu teplot od -50 do $100 \text{ }^\circ\text{C}$, s použitím speciálních pryskyřic až do $150 \text{ }^\circ\text{C}$ [9]. Některé fyzikální a mechanické vlastnosti těchto specifických kompozitních materiálů s konkrétními typy matrice a sklovýztuží jsou uvedeny v příloze č. 1.

Kompozitní materiály můžeme dělit podle různých kritérií – podle geometrie výztuže, rozměrů výztuže, materiálu výztuže, materiálu matrice, orientace vláken, atd.

1.1 Rozdělení podle geometrie výztuže

Podle geometrického tvaru výztuže rozlišujeme kompozity **částicové** a **vláknové** [2], viz grafické znázornění na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie výztuže [10].

1.1.1 Částicové kompozity

Částicové kompozity jsou charakteristické tím, že jeden rozměr výztuže výrazně nepřesahuje ostatní rozměry. Výztuž může mít kulovitý, destičkový, tyčinkovitý nebo i nepravidelný tvar. Částice významně napomáhají ke zlepšení vlastností výsledného materiálu – zvyšují tuhost, teplotní odolnost a odolnost proti opotřebení a otěru, zlepšují obrobitelnost, redukuje smrštění, atd. [1, 11].

Částice jako výztuž kompozitů s polymerní matricí jsou vyrobeny většinou mletím anorganických materiálů, jsou to převážně hlinitokřemičitany (mastek, kaolín), vrstevnaté hlinitokřemičitany (slídy) a uhličitany (vápenec, baryt). Je možné použít také práškový kov či cement (u reaktoplastů). Ke zvýšení kluzných vlastností a odolnosti proti otěru lze kombinovat částice bronzu s částicemi grafitu, sulfidu molybdenu nebo polytetrafluoretylenu. Velký podíl anorganických částic snižuje hořlavost, např. polyolefiny (PE, PP) vyztužené částicemi $Mg(OH)_2$ nebo $Al(OH)_3$ jsou samozhášivé [2].

Nejčastěji používanými materiály výztuží pro částicové kompozity s kovovými matricemi jsou SiC, Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , Y_2O_3 , WC a další. Tyto velmi tvrdé částice značně zvyšují tvrdost, mez kluzu a pevnost. Příklady kompozitů s částicovou výztuží a jejich použití:

- SiC/Al – používají se pro výrobu brzdových obložení nebo u spalovacích motorů pro vysokou odolnost proti otěru a pro jejich zvýšenou tepelnou stabilitu,
- Y_2O_3/Ni – používají se např. u tryskových motorů letadel pro jejich stabilitu za vysokých teplot,
- WC(TiC)/Co – jsou velmi tvrdé kompozity pro obráběcí nástroje známé pod názvem slynuté karbidy (tzv. cermety – ceramic + metal),
- Al_2O_3/Cu – použití např. pro výrobu elektrod pro odporové svařování pro jejich vysokou odolnost proti otěru a deformacím za vyšších teplot [1, 2].

1.1.2 Vlákňové kompozity

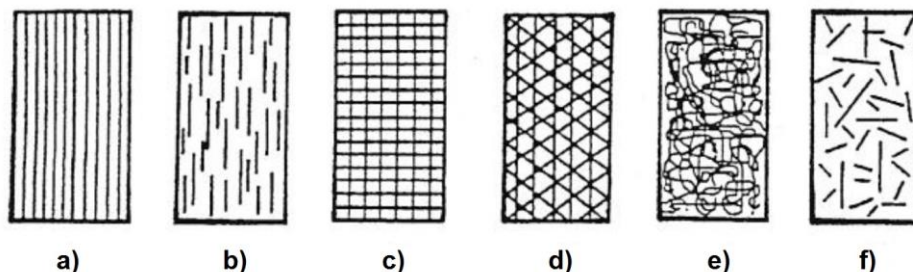
Pro vlákňové kompozity je charakteristický jeden rozměr výrazně větší než ty ostatní. Pevnost vláken v tahu v podélném směru výrazně převyšuje pevnost totožného materiálu v kompaktní formě (deska, tyč, apod.). Čím je průměr vláken menší, tím je jejich pevnost vyšší. Vysoká pevnost vláken je dána především:

- poklesem velikosti a pravděpodobnosti výskytu defektů ve vláknech – s klesajícím průměrem roste pevnost vláken,
- orientací defektů ve směru osy vláken, které mají na výslednou pevnost mnohem menší vliv než defekty kolmé k ose vláken,
- orientací pevných vazeb ve směru osy vláken, kdy tzv. dloužením (mechanickým natahováním vláken) dochází k orientaci polymerních řetězců.

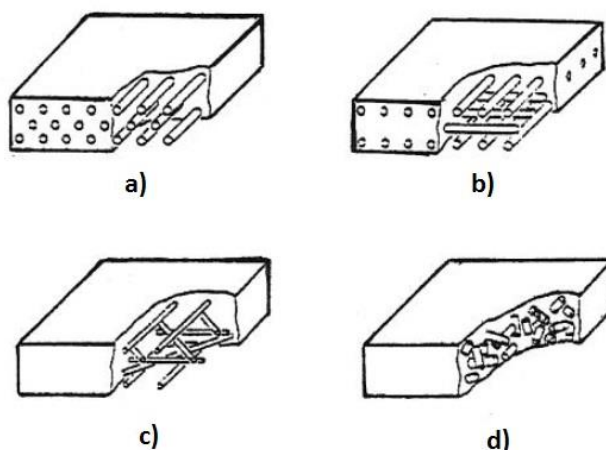
Vlákna vykazují anizotropní chování, jejich pevnost i modul pružnosti bývají ve směru osy vyšší než v kolmém směru. Z tohoto důvodu jsou kompozity nejpevnější ve směru vyztužujících vláken. Vlákna, kterými se kompozity vyztužují, mají za cíl

zvýšit pevnost, modul pružnosti (tuhost) a v některých případech i houževnatost (odolnost proti náhlému křehkému porušení) [1, 2].

Vláknové výztuže mohou být orientovány v jednom směru, ve více směrech, prostorově nebo zcela nahodile, příklady uspořádání vláken jsou znázorněny na obrázku 1.3 a 1.4 [2, 12].



Obr. 1.3 Příklady uspořádání vláken [12]: a) jednosměrná dlouhá vlákna, b) jednosměrná krátká vlákna, c) dvousměrná vlákna, d) vícesměrná vlákna, e) náhodně orientovaná dlouhá vlákna, f) náhodně orientovaná krátká vlákna.



Obr. 1.4 Prostorové uspořádání vláken [12]: a) jednosměrná dlouhá vlákna, b) dvousměrná dlouhá vlákna, c) vícesměrná dlouhá vlákna, d) vícesměrná krátká vlákna.

Vlastnosti vláknových kompozitních materiálů jsou závislé na fyzikálních a chemických vlastnostech výztuže a matrice, obsahu, orientaci a délce vláken a na způsobu výroby kompozitů. Nejlepších mechanických vlastností dosahují kompozity vyztužené jednosměrně orientovanými dlouhými vlákny. Při navrhování kompozitního materiálu musí platit, že pevnost a modul pružnosti vláken jsou podstatně vyšší než mechanické vlastnosti matrice, zároveň musí platit, že prodloužení matrice je vyšší než prodloužení vláken. Dále musí platit, že obsah vláken je vyšší než tzv. kritický obsah vláken. Podle požadovaných vlastností a směru namáhání výsledného výrobku je důležité volit orientaci a délku vláken, která má také vliv na náročnost výrobní technologie – čím vyšší požadavky na orientaci vláken, tím náročnější technologie výroby [13].

Podle geometrie výztuže lze dále rozlišovat např. skeletové, lamelární nebo hybridní kompozity [12, 14].

1.2 Rozdělení podle rozměru výztuže

1.2.1 Nanokompozity

Nanokompozity jsou materiály s polymerní matricí charakteristické velikostí částicové výztuže, která se pohybuje v jednotkách až stovkách nm. Používají se např. v lékařském, potravinářském, elektrotechnickém a automobilovém průmyslu [2].

1.2.2 Mikrokompozity

Mikrokompozity jsou v průmyslových odvětvích nejběžněji používanými kompozitními materiály pro svoji nízkou hustotu v porovnání s kovy a jejich slitinami, díky níž vynikají příznivým poměrem pevnosti v tahu a modulem pružnosti k hustotě [2].

1.2.3 Makrokompozity

Makrokompozity nacházejí největší uplatnění ve stavebnictví, nejznámějším příkladem makrokompozitu je železobeton – beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty. Výztuž těchto materiálů běžně dosahuje v příčném směru hodnot jednotek až stovek mm [2].

1.3 Rozdělení podle materiálu vláken

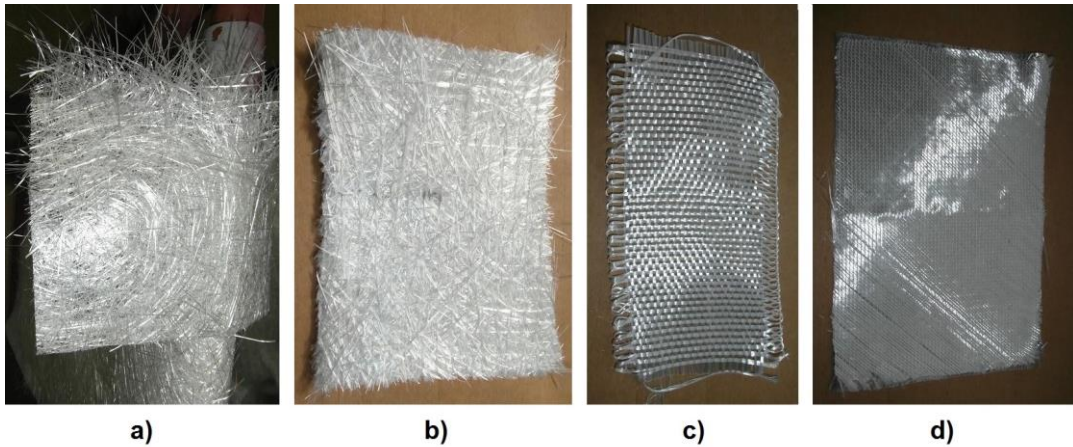
Vlákna jsou vyztužujícími fázemi kompozitních materiálů. Jejich pevnost v tahu v podélném směru výrazně převyšuje pevnost stejného kompaktního materiálu. Obecně platí, že čím vyšší je obsah vláken, tím vyšší je pevnost. Kromě obsahu vyztužujících vláken je pro výslednou pevnost kompozitního materiálu rozhodující také uspořádání a typ vláken [6, 15].

Vláknové výztuže jsou dodávány v pramencové nebo plošné formě, jen zřídka jsou používána samostatná vyztužující vlákna. Mezi nepoužívanější typy výztuží patří:

- roving (pramenec) – sdružené prameny nestočených vláken navinuté na cívku, používá se převážně pro díly vyráběné navíjením nebo pultruzí,
- rohož ze sekaných pramenců – 25 až 50 mm dlouhá sekaná vlákna orientovaná náhodně spojená pojivem do plošných rohoží, nejčastěji se používají rohože o plošné hmotnosti 300 až 600 g·m²,
- povrchová rohož – proti předchozí rohoži má jemnější strukturu a nižší plošnou hmotnost (20 až 50 g·m²), používá se převážně v povrchové vrstvě k zamezení prorýsování hrubší rohože do pohledové plochy dílu,
- objemová rohož – sendvičový materiál ze dvou vrstev rohože (300 až 600 g·m²) a syntetického PP jádra (180 nebo 250 g·m²), používá se pro díly vyráběné injektážními technologiemi (např. RTM),

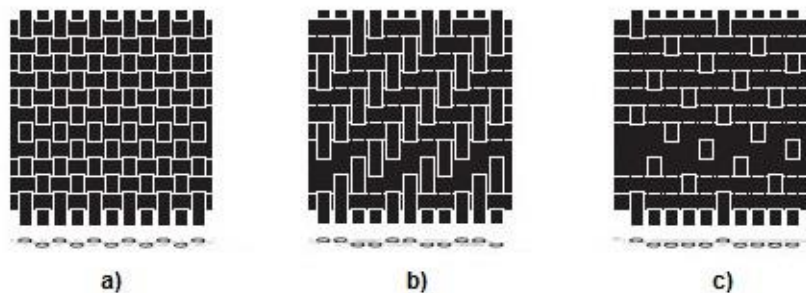
- tkanina – vyrábí se z vláken nebo pramenců uložených ve dvou nebo více směrech v různých plošných hmotnostech, díky tkané vazbě má vyšší obsah vláken a používá se pro zvýšení pevnosti a tuhosti dílů [8, 16].

Příklady výztuží jsou zobrazeny na obrázku 1.5.



Obr. 1.5 Příklady výztuží: a) rohož, b) objemová rohož, c) tkanina (biaxiální), d) tkanina (triaxiální).

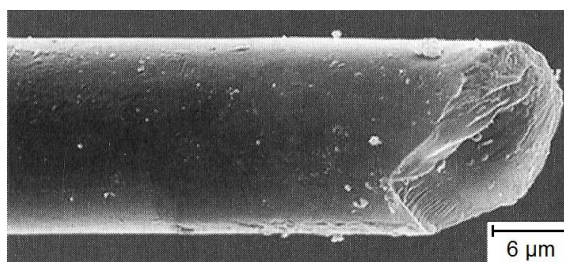
Pramence vláken v tkaninách mohou být utkány rozdílným křížením vláken, které se nazývají vazby, viz příklady na obrázku 1.6. **Plátňová vazba** je základní vazbou, která se jednoduše zpracovává a má dobrou rozměrovou stálost a malý otřep při řezání. **Keprová vazba** má při zpracování menší zvlnění vláken a tkanina s touto vazbou je ohebnější, je tedy vhodná pro tvarově složitější díly, které pak vynikají vyšší pevností a tuhostí. **Atlasová (saténová) vazba** vykazuje menší vychýlení vláken proti keprové vazbě a také velmi dobrou řasitelnost, proto je vhodná pro prostorově složitější díly, které díky této vazbě získají velmi hladký povrch [8].



Obr. 1.6 Druhy vazeb v tkaninách: a) plátňová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová (saténová) vazba [17].

1.3.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna (GF – glass fibre, obr. 1.7) jsou v praxi nejčastěji používanými vlákny pro vyztužení kompozitů s polymerní matricí díky jejich vysoké měrné pevnosti (podíl pevnosti v tahu k hustotě) a nízké ceně v porovnání s jinými vlákny. Mezi jejich další výhody patří výborné tepelné vlastnosti, nehořlavost a nízký součinitel teplotní roztažnosti oproti jiným konstrukčním materiálům. Nevýhodou těchto vláken je nízký modul pružnosti v tahu [8].



Obr. 1.7 Skleněné vlákno [8].

Vlákna se vyrábí tažením z taveniny Si_2O s příměsí dalších oxidů (Al, Ca, Mg, B, aj.), kdy sklovina vytéká tryskami z platinové slitiny a tuhne do tvaru vláken, která jsou dále dloužením zpracována do požadovaného průměru (obvykle 3,5 až 20 μm) a navíjena na cívku. Takto vyrobená vlákna jsou však velmi křehká, proto jsou před navinutím na cívku lubrikována. Lubrikace zajišťuje ochranu elementárních vláken, poskytuje vláknům potřebné kluzné vlastnosti, zlepšuje spojení vláken s matricí a odvádí elektrostatický náboj [8, 16].

Více jak 90 % skleněných vláken se vyrábí z tzv. **E-skla**, které vyniká dobrými tvárnými vlastnostmi, vysokým elektrickým odporem, odolností proti korozi i silným alkalickým roztokům. Dalším typem je tzv. **A-sklo**, které se používá pro láhve a okna, vykazuje však velké hmotnostní ztráty ve vroucí vodě oproti E-skle. **C-sklo** má proti E-skle vyšší odolnost proti kyselinám a chemicky agresivním látkám, ale nižší pevnost a odolnost proti alkáliím. **D-sklo** má nízkou dielektrickou konstantu a horší mechanické vlastnosti než E-sklo, používá se hlavně v elektrotechnice, elektronice a energetice. Předností **M-skla** je vysoká pevnost i modul pružnosti, které však značně klesají se zvyšující se teplotou, a také výborná odolnost proti vodě a kyselinám. **S-sklo** má vyšší pevnost i modul pružnosti než E-sklo, dále vyšší teplotní odolnost a odolnost proti kyselinám. Hlavní použití je v letecké a raketové technice. **R-sklo** má vyšší modul pružnosti a se zvyšující se teplotou jeho pevnost vykazuje menší pokles. Dalším typem je **sklo z taveného křemene**, jehož přednosti jsou v nízké hustotě, vysoké pevnosti a odolnosti proti vyšším teplotám. Speciálním typem je **L-sklo** s vysokým obsahem olova, které se používá v lékařství, vědeckých přístrojích a pro vojenské účely díky zvýšené ochraně proti radiačnímu záření [8, 15, 16]. Typické vlastnosti skleněných vláken jsou uvedeny v následující tabulce.

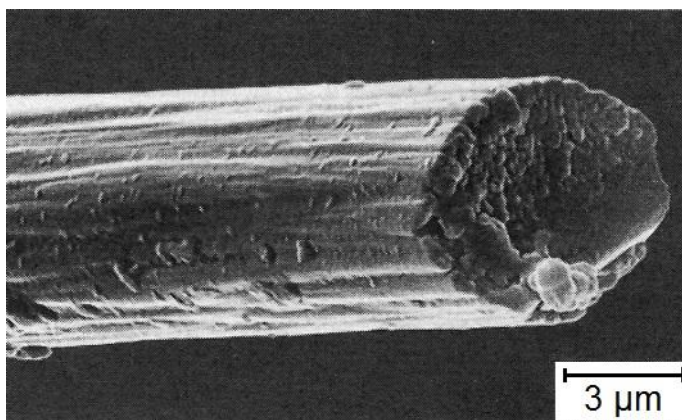
Tab. 1.1 Vlastnosti skleněných vláken [15].

Typ skla	Vlastnost			
	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Součinitel teplotní roztažnosti [$10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$]
E-sklo	2 540	3 500	72	4,9
A-sklo	2 480	3 100	74	8,5
C-sklo	2 490	3 200	71	7,2
D-sklo	2 160	2 500	54	3,1
M-sklo	2 890	3 500	112	5,0
S- a R-sklo	2 480	4 900	88	2,9
Tavený křemen	2 200	nad 6 000	75	5,5

1.3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF – carbon fibre, obr. 1.8) se vyznačují velmi vysokou pevností v tahu, vysokým modulem pružnosti, tepelnou a korozní odolností a nízkou hustotou, mají však nízkou tažnost a jsou křehčí než např. skleněná vlákna. Uhlíková vlákna jsou krystalická a jejich vlastnosti závisí na orientaci jednotlivých vrstev, na rozměrech

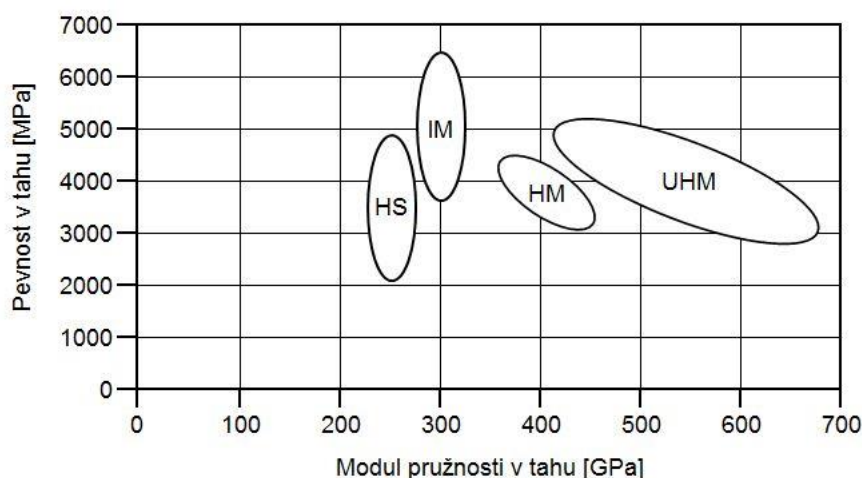
a uspořádání krystalů v příčném řezu, na obsahu vnitřních defektů a kvalitě povrchu vláken. Čím jsou vlákna lépe orientovaná, tím lepších mechanických vlastností dosahují [2, 8, 16].



Obr. 1.8 Uhlíkové vlákno [8].

Podle hodnot pevnosti v tahu a modulu pružnosti rozdělujeme uhlíková vlákna na (obr. 1.9):

- vysokopevnostní (HS – high strength),
- ultravysokopevnostní (UHS – ultra high strength),
- středněmodulová (IM – intermediate modulus),
- vysokomodulová (HM – high modulus),
- ultravysokomodulová (UHM – ultra high modulus).



Obr. 1.9 Rozdělení uhlíkových vláken [8].

Vlastnosti uhlíkových vláken jsou uvedeny v tabulce 1.2.

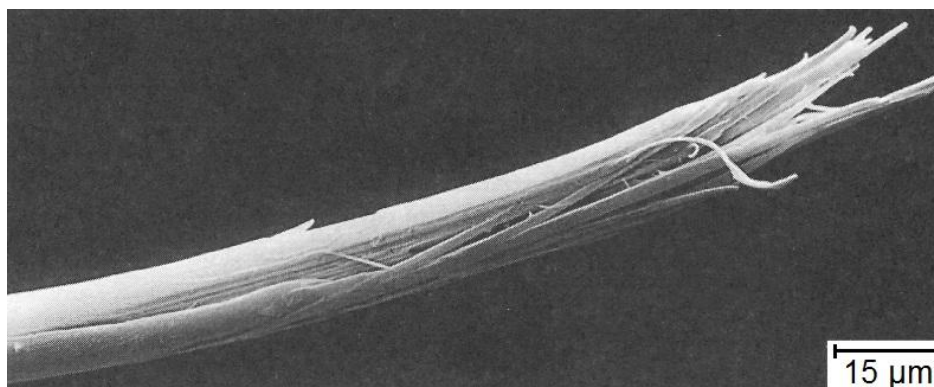
Tab. 1.2 Vlastnosti uhlíkových vláken [15].

Typ uhlíkového vlákna	Vlastnost		
	Hustota [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
HS - vysokopevnostní	1 730 - 1 870	2 000 - 3 100	200 - 250
UHS - ultra vysokopevnostní	1 800 - 2 000	> 3 100	200 - 250
HM - vysokomodulové	1 800 - 2 000	> 1 700	300 - 400
UHM - ultra vysokomodulové	1 950	> 1 700	> 400

Uhlíková vlákna se vyrábí dvěma základními postupy. Prvním z nich je vysokoteplotní rozklad bez přístupu vzduchu, tzv. pyrolýza, kdy se přeměňuje polyakrylonitril (PAN) na grafitickou strukturu. Dloužením je pak dosaženo usměrnění uhlíkových vrstev ve směru osy vlákna, čímž vlákna získají vysokou pevnost v tahu i modul pružnosti. Dalším tepelným zpracováním lze zvýšit modul pružnosti, avšak pevnost v tahu klesne. Druhý výrobní postup zpracovává suroviny bohaté na uhlík – smolu na bázi kamenouhelného dehtu nebo dehet, který vzniká při destilaci ropy. Uhlíková vlákna mají obvykle průměr 5-10 μm . Proti skleněným vláknům je jejich cena 2- až 100-násobná (v závislosti na typu vláken) [8, 14, 16].

1.3.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF – aramid fibre) patří do skupiny aromatických polyamidů a vyznačují se vysokou pevností a tuhostí a nízkou hustotou ($\rho = 1450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Výrazně se však liší hodnoty pevnosti a E-modulu měřené v podélném a příčném směru vláken – E-modul ve směru vláken je mnohem vyšší než v podélném směru, mez pevnosti v tahu je výrazně vyšší než mez pevnosti v tlaku. Díky těmto anizotropním vlastnostem se kompozity s aramidovými vlákny hodí pro lehké konstrukce, kde převládá tahové namáhání, nehodí se pro konstrukce namáhané tlakem nebo ohybem. Aramidová vlákna absorbují vlhkost, což se negativně projevuje na pevnosti spoje mezi matricí a vláknem, ale i na pevnosti samotného vlákna. K výraznému snížení pevnosti dochází u těchto vláken vlivem záření s vysokou energií – např. UV záření. Další nevýhodou je obtížná obrobitelnost dílů z aramidových kompozitů [8].



Obr. 1.10 Aramidové vlákno [8].

Výroba aramidových vláken spočívá ve zvláknování 20% roztoku PPTA (polyfenylentereftalamid) v koncentrované kyselině sírové. Během tohoto procesu dochází k orientaci molekul v podélném směru vlákna, čímž je dosaženo vysoké pevnosti a tuhosti. Vlákna se dále neutralizují ve vodní nádrži, suší se a pro zvýšení kluzných vlastností se opatřují aviváží. Dloužením za zvýšené teploty je možné hodnoty mechanických vlastností ještě zvýšit. Průměr vláken bývá okolo 12 μm [2, 8, 13].

Aramidová vlákna se vyrábějí ve třech strukturních modifikacích: meta-aramidy, para-aramidy a kopolymery aromatických amidů, které se vzájemně liší hodnotami tažnosti a E-modulu, viz tabulka 1.3. Nejpoužívanějšími jsou para-aramidy, jejichž nejznámějším představitelem je Kevlar od firmy DuPont [8, 13].

Tab. 1.3 Vlastnosti aramidových vláken [8].

Typ aramidového vlákna	Vlastnost			
	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tažnost [%]
vysokotažné	1 450	3 600	80	4,0
s vysokou tuhostí	1 450	3 800	131	2,8
ultratuhé	1 450	3 400	186	2,0

1.3.4 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna se vyznačují nízkou hustotou, odolností proti stárnutí, snadnou recyklací a v neposlední řadě i nízkou cenou. Mezi jejich nevýhody patří nižší mechanické vlastnosti, omezená délka vláken a vysoká citlivost na vlhkost a teplotu. Základ těchto vláken tvoří celulóza. Díky svým vlastnostem jsou přírodní vlákna vhodná pro méně náročné konstrukce. Typickými příklady přírodních vláken jsou vlákna lněná, bavlněná, jutová, konopná, kokosová, sisalová, aj. (obr. 1.11). Vlastnosti některých vláken jsou uvedeny v tabulce 1.4 [3, 8, 13].



Obr. 1.11 Přírodní vlákna [18].

Tab. 1.4 Vlastnosti přírodních vláken [3, 8].

Typ přírodního vlákna	Vlastnost			
	Hustota [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tažnost [%]
Konopí	1 450	600	70	1,6
Len	1 480	750	30	2,0
Juta	1 400	550	55	2,0
Bavlna	1 500	300	27	10,0
Sisal	1 450	600	20	2,0

1.3.5 Keramická vlákna

Keramická vlákna se vyznačují vysokou pevností a tuhostí a poměrně nízkou hustotou, mají vysokou teplotní odolnost a stabilitu, proto se používají v kompozitech s kovovou a keramickou maticí. Mají malou tepelnou roztažnost a malou závislost pevnosti na teplotě. Keramická vlákna jsou poměrně krátká a více než vláknům se blíží jehlicím nebo tyčinkám, díky tomu vykazují vysokou ohybovou tuhost. Nevýhodou je jejich křehkost. Mezi keramická vlákna řadíme vlákna uhlíková, bórová a vlákna vyrobená z karbidů, nitridů a oxidů, vlastnosti některých z nich jsou uvedeny v tabulce 1.5 [3, 11, 15].

Tab. 1.5 Vlastnosti keramických vláken [11].

Typ keramického vlákna	Vlastnost		
	Hustota [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Al ₂ O ₃	3 150 - 4 000	2 070 - 2 080	172 - 470
SiC	3 300	3 300	420
B	2 630	3 500	400
ZrO ₂	4 840	2 070	344
BN	1 900	1 380 - 2 400	90 - 315
B ₄ C	2 300 - 2 500	2 070 - 2 420	276 - 480

Bórová vlákna jsou do teploty 450 °C vysoce pevná a tuhá, nad touto teplotou však rychle ztrácí své vlastnosti. Pro použití za vyšších teplot je nutné vlákna chránit povlakem SiC, BN či B₄C (tzv. Borsic vlákno). Tato vlákna se vyrábí metodou CVD (chemical vapour deposition) z plynné směsi vodíku a BCl₃, kdy na tenký wolframový drát se nanáší bórová vrstva. Pro dosažení nižší ceny bórových vláken se wolframové jádro nahrazuje uhlíkovými vlákny [11, 15].

1.3.6 Kovová vlákna

Kovová vlákna se používají k vyztužení kompozitů s polymerní, keramickou i kovovou maticí. Vyrábějí se o průměru v řádu desítek μm z wolframu, molybdenu, oceli, beryllia, hliníku, slitin titanu apod. Ocelová a hliníková vlákna mají nízkou cenu,

ostatní jsou poměrně drahá. Nevýhodou většiny kovových vláken je vysoká hustota v porovnání s jinými vlákny. Vlastnosti některých kovových vláken jsou uvedeny v tabulce 1.6.

Pro teploty do 300 °C se používají ocelová vlákna z uhlíkové oceli, pro vyšší teploty wolframová nebo molybdenová vlákna. Vývoj se zaměřuje i na kovokeramická vlákna na bázi oxidů, např. Al-B-Si, Al-Cr-Si nebo Zr-Si [11, 15].

Tab. 1.6 Vlastnosti kovových vláken [11].

Typ kovového vlákna	Vlastnost		
	Hustota [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Ocel	7 740	2 800 - 4 140	200
Be	1 830	1 270	200 - 315
Al	2 660	600	73
Cr	7 150	1 000 - 4 000	353 - 424
Mo	10 200	2 410	358
Ti slitiny	4 510	550 - 2 200	118
Ni slitiny	8 200	2 300	220

1.3.7 Whiskery

Whiskery jsou vláknité monokrystaly o průměru kolem 1 μm, které svými vlastnostmi výrazně převyšují vlastnosti jiných vláken. Proti jiným vláknům nemají kruhový průřez, ale čtvercový, šestiúhelníkový nebo rovnoběžníkový. Jejich povrch i vnitřní struktura nevykazují téměř žádné poruchy a platí, že čím menší průměr vláken, tím méně poruch a tím i vyšší mechanické vlastnosti. [11, 15]. Vlastnosti některých whiskerů jsou uvedeny v tabulce 1.7.

Tab. 1.7 Vlastnosti whiskerů [11].

Typ whiskeru		Vlastnost		
		Hustota [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu [GPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Keramické	Al ₂ O ₃	4 000	15	2 250
	SiC	3 200	21	840
	BeO	3 000	7	720
	B ₄ C	2 500	14	482
	Si ₃ N ₄	3 100	14	380
	grafit	1 600	19	700
Kovové	Cr	7 200	9	240
	Cu	8 900	3	120
	Ni	9 000	4	213
	Fe	7 800	13	200

1.4 Rozdělení podle materiálu matrice

Matrice v kompozitu slouží k prosycení vyztužujících vláken a dalších komponent za účelem dosažení tvarově stálého finálního výrobku. Dalšími funkcemi matrice jsou zaručení geometrického tvaru, přenos namáhání z vlákna na vlákno a ochrana vláken před vlivy okolí. Důležitým aspektem pro kvalitní kompozit je dobrá soudržnost matrice s vyztužující fází a rovněž vhodná viskozita a povrchové napětí k úplnému smočení vláken bez vzniku bublin [8].

Matrice může být polymerní, kovová, keramická, uhlíková, skleněná, sklokeramická, aj.

1.4.1 Kompozity s polymerní matricí

Matrice se u kompozitů s polymerní matricí (PMC – polymer matrix composites) dělí na termosety (reaktoplasty) a termoplasty. První skupina matric je v dnešní době používána pro většinu aplikací a proto jí bude věnována největší pozornost. Snadněji se zpracovávají, mají lepší smáčivost a lépe prosycují vyztužující vlákna. Je to dáno jejich nižší viskozitou oproti termoplastům a faktem, že jsou většinou při normální teplotě v tekutém stavu [8].

Reaktivní pryskyřice jsou vytvrzovány přidáním katalyzátoru a urychlovače, případně za působení tepla, světla nebo záření. Nazývají se také licí, laminační, impregnační, prosycovací nebo zalévací pryskyřice. Proti termoplastům mají sice vyšší pevnost a modul pružnosti, ale jsou křehčí a méně tažné. Houževnatost však lze zvýšit modifikačními přísadami. Matrice z termosetu vykazuje proti termoplastu vyšší teplotní odolnost, odolnost proti creepu a deformaci při zátěži. Dalšími výhodami jsou jejich nízká hmotnost, nízké zpracovatelské náklady, rozměrová stabilita, chemická odolnost aj. [6, 8].

Vlastnosti polymerních matric jsou uvedeny v tabulce 1.8.

Tab. 1.8 Vlastnosti polymerních matric [19].

Typ matrice		Vlastnost		
		Hustota [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]
Termoset	Polyesterová	1 200	80	4 000
	Vinylesterová	1 150	75	3 300
	Epoxydová	1 200	130	4 500
	Fenolická	1 300	70	3 000
	Silikonová	1 100	35	2 200
	Polyimidová	1 400	70	4 000 - 19 000
Termoplast	PP	900	30	1 200
	PPS	1 300	65	4 000
	PA	1 100	70	2 000
	PES	1 350	85	3 000
	PEI	1 250	105	3 500
	PEEK	1 300	90	4 000

Nejdůležitějšími typy reaktivních pryskyřic jsou:

- nenasycené polyesterové pryskyřice (UP),
- vinylesterové pryskyřice (VE),
- epoxidové pryskyřice (EP),
- fenolické pryskyřice,
- metakrylátové pryskyřice (MA),
- izokyanátové pryskyřice [8].

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)

Tyto pryskyřice jsou bezbarvé až slabě nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech. Jsou nejpoužívanějším materiálem pro výrobu kompozitních dílů. Důvody jsou převážně jejich nízká cena, dobré smáčení vláken, nízká viskozita, velká variabilita při zpracování a regulovatelná rychlost vytvrzování, které může probíhat za normálních nebo zvýšených teplot. Při vytvrzování dochází k uvolnění reakčního tepla a k objemovému smrštění o 5 až 9 %. Vysokoviskozní pryskyřice se rozpouštějí ve styrenu, který zároveň účinkuje jako kopolymerační monomer. Styren však patří mezi organické těkavé látky a jeho emise má negativní dopad na životní prostředí. Vytvrzené pryskyřice vykazují dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, odolnost proti chemikáliím a povětrnostním vlivům a vysoký lesk [8, 9].

Podle druhu základní molekuly rozlišujeme několik druhů polyesterových pryskyřic, které se liší svými vlastnostmi. UP se vyrábějí reakcí dikarbonových kyselin (např. ortoftalové, izoftalové, tereftalové, fumarové či maleinové) s glykoly (např. 1,2-propylenglykol či neopentylglykol). Kromě anhydridu kyseliny maleinové jsou nejčastěji používány anhydridy kyseliny ftalové, kdy kyselina ortoftalová zapříčiňuje zlepšení zpracovatelnosti a zvýšení chemické odolnosti, kyselina tetrahydroftalová má za následek zvýšení houževnatosti a tepelné odolnosti a kyselina izoftalová s tereftalovou zvyšují odolnosti proti hydrolýze [8].

Výrobky z nenasycených polyesterových pryskyřic musí být vždy zcela vytvrzeny, aby nedocházelo k dodatečnému smrštění, nasákavosti nebo snížení chemické odolnosti. Působení vzdušného kyslíku totiž silně zpomaluje vytvrzování při pokojové teplotě a nezakryté plochy zůstávají lepivé. Obsah styrenu v pryskyřici, kterého je běžně 30 až 50 %, významně ovlivňuje viskozitu. Jeho zvýšením lze dosáhnout snížení viskozity a tím i lepší zpracovatelnost pryskyřice a snadnější prosycení vláken, vyšší obsah styrenu však má za následek zkrěhnutí materiálu. Nejen styrenem, ale i dalšími přísadami, lze u UP měnit zpracovatelnost a vlastnosti finálních výrobků, stejně tak např. změnou chemické struktury či přidáním aditiv. Přísady jsou často používány jako objemové plnivo či jako zlevňující materiál, snižují smrštění a tím zvyšují rozměrovou stálost a snižují součinitel tepelné roztažnosti. Jako příklady plniv lze uvést křída, kaolin a hydroxid hlinitý [8].

Vytvrzování UP je způsobeno radikálovou kopolymerizací dvojných vazeb v pryskyřici s dvojnými vazbami molekuly styrenu. Jako tvrdidlo se používají organické peroxidy (R-O-O-R), které se za působení urychlovače a tepla nebo pouze tepla rozpadají na radikály (RO-). Stejný pryskyřičný systém může být vytvrzen v řádu několika minut nebo i dnů, rychlost vytvrzování lze ovlivňovat množstvím přidaného katalyzátoru a hlavně urychlovačem. Přidáním inhibitorů lze prodloužit

dobu zpracovatelnosti, ty totiž mají za následek zpomalení vytvrzovací reakce. Lze konstatovat, že způsob vytvrzování (za studena nebo za tepla) je silně závislý na volbě jednotlivých komponent při přípravě pryskyřice a kombinaci vytvrzovacího systému. V praxi se pro vytvrzování při teplotě do 80 °C používají převážně dva systémy: ketonperoxydy s kobaltovým urychlovačem a benzoylperoxid s aminovým urychlovačem. Systém s kobaltovým urychlovačem se používá převážně pro díly, které jsou vystaveny povětrnostním vlivům a pro tvarově stálé velkoplošné konstrukční díly. Aminový urychlovač umožňuje vytvrzování i při nízkých teplotách okolo 0 °C, avšak nehodí se pro díly vystavené UV záření, protože tyto jeho vlivem žloutnou [8].

V tabulce 1.9 jsou uvedeny vlastnosti některých UP z různých výchozích materiálů.

Tab. 1.9 Vlastnosti nenasycených polyesterových pryskyřic [8].

Základní složky	Vlastnosti					Popis, použití
	η [mPa·s]	HDT [°C]	σ_{Pt} [MPa]	E [MPa]	A [%]	
Kyselina orto-ftalová, standardní glykoly	540 - 610	63	70	4 300	2,0	Nízo až středně reaktivní, pro méně namáhané konstrukční prvky; stavba lodí
	700 - 900	90	85	4 400	2,4	Středně až vysoce reaktivní, sklon k vzniku trhlin; nádrže, potrubí, výlisky
	240 - 290	108	80	3 470	4,2	Vysoce reaktivní, nízkoviskozní, dobré prosycování při ruční laminaci a injektování
Dicyklo-pentadien	450 - 1 000	70	66	3 500	3,0	Dobré zesíťování, nízké prorážení výztuže; stavba lodí
Kyselina tereftalová	540 - 610	125	60	3 350	2,1	Vysoká tepelná odolnost; nádrže, potrubí
Kyselina maleinová, standardní glykoly	1 150 - 1 400	145	55	3 400	1,7	Základní typ pro lisovací hmoty (SMC) s malým smrštěním
Kyselina izo-ftalová, standardní glykoly	3 000 - 3 600	130	60	3 700	1,8	Vysokoviskozní typ pro lisovací hmoty (SMC/BMC), dobrá odolnost proti hydrolýze

η - viskozita, HDT - tvarová stálost za tepla, σ_{Pt} - mez pevnosti v tahu, E - modul pružnosti v tahu, A - tažnost.

Vinylesterové pryskyřice (VE)

Vinylesterové pryskyřice se proti polyesterovým vyznačují vyšší houževnatostí, odolností proti povětrnostním vlivům a UV záření, chemickou odolností, tvarovou stálostí za tepla, lepšími hydrofobními vlastnostmi a také vyšší cenou. Podobně jako u UP existuje celá řada různých typů v závislosti na výchozích surovinách. Jedná se převážně o VE na bázi epoxidu z bisfenolu A, na bázi epoxidového novolaku a vinylesteruretanovou pryskyřici (např. na bázi bisfenolu A epoxidu) [8, 16].

VE na bázi bisfenolu A jsou typické vyšší houževnatostí, velmi dobrou odolností proti alkalickému prostředí, ale nižší tvarovou stálostí za tepla. VE ze základních složek fenolických pryskyřic vykazují vyšší reaktivitu, vyšší stupeň zesílení, nižší viskozitu, odolnost proti aromatickým uhlovodíkům a vyšší odolnosti proti vyšším teplotám, jsou však relativně křehké. Vinylesteruretanové pryskyřice mají dobré mechanické vlastnosti, výbornou odolnosti proti vysokým teplotám (HDT=210 °C), vysokou chemickou odolnost a poskytují dobrou vazbu se skleněným vláknem. Proti vinylesterovým pryskyřicím jsou však křehčí a více nasákavé [8].

Pro své dlouhodobě výborné vlastnosti a trvanlivost se VE používají mimo jiné pro výrobu nádrží, trubek, podzemních zásobníků, komínů a dalších výrobků v chemickém, těžařském, papírenském, elektrárenském, leteckém, strojírenském průmyslu a v mnoha dalších odvětvích [8, 16].

Zpracování a vytvrzování VE je podobné jako u UP. Většinou bývají rozpuštěny ve styrenu a vytvrzují se peroxidem. VE jsou složeny z epoxidové pryskyřice a kyseliny akrylové nebo metakrylové. Vlastnosti některých pryskyřic jsou popsány v tabulce 1.10 [8].

Tab. 1.10 Vlastnosti vinylesterových pryskyřic [8].

Základní složky	Vlastnosti					Popis, použití
	η [mPa·s]	HDT [°C]	σ_{Pt} [MPa]	E [MPa]	A [%]	
Bisfenol A-epoxid	440 - 500	105	95	3 600	6,1	Středně reaktivní; pro nádrže, potrubí, sanaci kanálů
	360 - 400	105	95	3 600	6,1	Středně reaktivní, se sníženou emisí styrenu
	650 - 750	107	90	3 800	3,9	Velmi dobré mechanické vlastnosti a chemická odolnost; prepregy na sanaci kanálů odpadních vod
	400 - 500	115	83	3 500	4,2	Pro prepregy a lisovací hmoty s vysokou protikorozní a chemickou odolností; pro části automobilů
Bisfenol A-uretan	400 - 500	125	85	3 300	5 - 6	Vysoká tepelná a chemická odolnost, vhodná pro aramidová vlákna; navíjení, odstředivé lití, stříkání
Flexibilizovaný A-uretan	210 - 280	140	90	3 500	4,0	Vysoká tepelná a chemická odolnost, vysoká pružnost, velmi dobré prosycení vláken; navíjení (nádrže), odstředivé lití
Epoxid novolak	1 000	135	75	3 400	2,6	Tepelná a korozní odolnost; nádrže, potrubí, komíny

η - viskozita, HDT - tvarová stálost za tepla, σ_{Pt} - mez pevnosti v tahu, E - modul pružnosti v tahu, A - tažnost.

Epoxidové pryskyřice (EP)

Epoxidové pryskyřice obsahují v molekule alespoň jednu epoxidovou skupinu, která je velice reaktivní s velkým počtem látek a tvoří s nimi makromolekulu. Díky tomu lze epoxidy používat jako lepidla, zalévací a lisovací hmoty, pojiva pro lamináty

nebo lékařské pryskyřice. EP vynikají mechanickými a elektrickými vlastnostmi, výbornou přilnavostí k různým podkladům, mají dobré elektroizolační vlastnosti, vysokou odolnost proti vodě, alkáliím, kyselinám a některým rozpouštědlům. Díky nízkému smrštění okolo 2 % vykazují vysokou rozměrovou stálost, což je výhodné pro díly, u kterých jsou požadovány přesné rozměry. Z důvodu vysoké kvality epoxidových pryskyřic jsou tyto často používány v kombinaci s drahými výztužemi, např. s uhlíkovými. Nevýhodou je několikanásobně vyšší cena proti polyesterovým pryskyřicím [8, 16].

EP se s tvrdidlem musí mísit v přesném stechiometrickém poměru, což je základ pro polyadiciční reakci. Při této reakci se váže vodíkový atom tvrdidla (např. diaminu) na kyslíkový atom epoxidové skupiny. Vznikne polární OH- skupina, která zapříčiňuje dobrou přilnavost těchto pryskyřic. Polyadice není řetězovou reakcí na rozdíl od radikálové reakce. Je pomalá a vstupuje do ní několik molekul pryskyřice s molekulami tvrdidla, čímž se molekulární hmotnost zvyšuje pozvolna. I přes to, že je již spojeno mnoho vazeb pryskyřice-tvrdidlo, reakční směs zůstává tekutá [8].

Epoxidové pryskyřice je možné rozdělit do dvou základních skupin – typy, které obsahují glycidylové skupiny, a typy obsahující epoxidové skupiny. Pryskyřice z první skupiny zaujímají cca 85 % světové produkce a připravují se reakcí epichlorhydrinu s vhodnými surovinami. Mezi nejdůležitější druhy patří Bisfenol A. EP jsou bezbarvé až nažloutlé, vysoce viskózní kapaliny s teplotou tavení do 150 °C a s téměř neomezenou skladovatelností. Vytvrzování může být uskutečněno polyadici probíhající na epoxidových skupinách, polykondenzací na přítomných hydroxidových skupinách nebo polymerací epoxidových skupin. Druhá skupina pryskyřic se připravuje epoxidací nenasycených sloučenin. Nejvýznamnějším druhem jsou novolakové pryskyřice (epoxynovolaky) na bázi fenolu, které jsou charakteristické vysokým počtem epoxidových skupin v molekule, které zapříčiňují vysoké zesíťování polotovaru a tím mu dávají vysokou tvarovou stálost za tepla a větší tepelnou odolnost. Novolakové pryskyřice se používají převážně pro elektroizolační účely. Roční produkce tohoto druhu EP činí ročně cca 10 % světové produkce. Cykloalifatické epoxidy se vyznačují nízkou viskozitou a odolností proti povětrnostním vlivům a UV záření v porovnání s aromatickými epoxidy, jsou tedy předurčeny pro exteriérové aplikace. Glycidylestery se řadí také mezi cykloalifatické epoxidy a jejich výhodami jsou nízká viskozita, velká reaktivita s anhydridy a výborné elektroizolační vlastnosti. Pro EP je kromě běžných údajů důležitý tzv. epoxidový ekvivalent, který říká, kolik váhová jednotka obsahuje epoxidových skupin. Tento údaj je, vedle dalších, používán pro výpočet stechiometrického poměru míchání pryskyřice a tvrdidla [8, 9].

Finální vlastnosti vytvrzených pryskyřic mohou být měněny celou řadou tvrdidel, které jsou ve většině případů přizpůsobeny konkrétní aplikaci. Kromě samotné volby tvrdidla, lze i vhodným výběrem pryskyřice dosáhnout různých vlastností pojiva. Vytvrzování může probíhat za studena i za tepla. Proti polyesterovým a vinylesterovým systémům jsou reakční časy delší, pro urychlení vytvrzování se většinou používá postupné zvyšování teploty, které eliminuje vnitřní pnutí. Rovněž ochlazování probíhá pomalu za účelem snížení vnitřního pnutí na minimální úroveň [8].

V tabulce 1.11 je uveden přehled některých typů epoxidových pryskyřic.

Tab. 1.11 Vlastnosti epoxidových pryskyřic [8].

Základní složky	Vlastnosti					Popis, použití
	η [mPa·s]	HDT [°C]	σ_{Pt} [MPa]	E [MPa]	A [%]	
Bisfenol A, EP s formulovaným aminovým tvrdidlem	5 200 - 6 000	185 - 195	110 - 120	2 800	5,5 - 6,5	Systém s dobrou odolností proti hydrolyze
Cykloalifatická pryskyřice s anhydridovým tvrdidlem a imidazolovým urychlovačem	150 - 250	188 - 193	48 - 65	3 050	1,8 - 2,5	Nízkoviskozní systém s vysokou tepelnou odolností; pro navijení, pultruzi aj.
Bisfenol A, EP s anhydridovým tvrdidlem a imidazolovým urychlovačem	600 - 900	145 - 153	80 - 90	3 200	5,0 - 7,0	Standardní systém vytvrzovaný anhydridem; pro navijení, pultruzi aj.
Formulovaná EP pryskyřice s cykloalifatickým aminovým tvrdidlem	500 - 700	143 - 148	71 - 77	2 600	4,5 - 5,5	Zpracovatelná technologií RTM pro navijení, lisování, laminování aj.
Houževnatá modifikovaná EP s aminovým tvrdidlem	720 - 860	100 - 110	120 - 130	2 800	9,0 - 12,0	Dobré mechanické vlastnosti a tažnost
Formulovaná EP s aminovým tvrdidlem	320 - 380 350 - 400	90 - 105	125 - 130	2 900	7,0 - 12,0	Nízkoviskozní flexibilní systém pro průmyslové aplikace
Formulovaná EP s tvrdidly na bázi alifatických polyamidů	300 - 400 550 - 800 1 000 - 1 200	81 - 86 77 - 82 85 - 89	70 - 74 82 - 86 85 - 90	3 200 3 500 3 700	10,0 - 13,0 5,2 - 5,8 5,0 - 6,2	Nastavitelná reaktivita; systém pro laminování velkých konstrukčních dílců
Formulovaný EP systém	200 - 300 220 - 230	80 - 85 80 - 85	74 - 78 77 - 81	3 300 3 300	5,8 - 6,2 7,2 - 8,0	Nastavitelná reaktivita; systém pro prosycování velkých konstrukčních dílců
Dvousložkový systém na bázi bismaleinimidu	800 - 1 000 (100 °C)	290 - 300	176	3 400	5,0 - 8,0	Systém s vysokou tepelnou odolností
Monomer kyanátesteru	100	240 - 260	162	2 900	3,0 - 4,0	Aplikace v leteckém průmyslu

η - viskozita (při 25 °C, není-li uvedeno jinak), HDT - tvarová stálost za tepla, σ_{Pt} - mez pevnosti v tahu, E - modul pružnosti v tahu, A - tažnost.

Fenolické pryskyřice (PF)

Fenolické pryskyřice se řadí mezi reaktivní pryskyřice a vyrábí se reakcí fenolu s formaldehydem. Stejně jako ostatní typy pryskyřic, i fenolické mohou být připravovány v různých variantách v závislosti na druhu fenolické suroviny, molárním poměru fenol/formaldehyd a chemických nebo fyzikálních modifikacích. Například při molárním poměru fenol/formaldehyd >1 s použitím kyselého katalyzátoru vznikají novolaky (tzv. dvoustupňové pryskyřice), při molárním poměru fenol/formaldehyd <1 při alkalické kondenzaci vznikají rezoly (tzv. jednostupňové pryskyřice) [8, 16].

Zesíťování fenolu a formaldehydu na rezoly nebo novolaky je polykondenzační reakce, při které dochází k odštěpování vody a amoniaku. Tato reakce je exotermní a je tedy nutné důkladné chlazení. Rezoly se vytvrzují nejčastěji působením tepla anebo použitím kyseliny. Při pokojové teplotě u nich probíhá pomalé vytvrzování, proto by neměly být skladovány déle než 3 měsíce. Pro zvýšení doby skladovatelnosti musí být jednostupňové pryskyřice skladovány při teplotě pod 5 °C. Novolaky se vytvrzují za použití tvrdidla (nejčastěji hexametylentetraminu) a zvýšené teploty. Proti rezolům je jejich doba skladovatelnosti mnohem delší, zpravidla 1-3 roky při teplotě do 25 °C [8, 16].

PF se jako matrice používají pro aplikace, kde je požadována snížená hořlavost, teplotní, povětrnostní, chemická a elektrická odolnost a tvarová stálost. Využití tedy nachází např. při výrobě roštů, které se používají při stavbě vrtných plošin nebo v různých oborech chemického průmyslu, dále jako pojivo brusných částic při výrobě brusných kotoučů nebo brzdových destiček a jako pojivo při výrobě zvukových a tepelných izolací. Díky snížené hořlavosti a malé toxicitě kouře nachází uplatnění pro vnitřní vybavení letadel, železničních vagonů a vozidel. Běžné je jejich použití při výrobě překližky a laminovaných papírových panelů, jako základ lepidel pro laminování dřeva a jako formovací směsi ve slévárnách. Nevýhodou těchto pryskyřic je nízká houževnatost, ztížené zpracování z důvodu používání kyselin a postupná ztráta lesku a kvality povrchu [8, 16].

1.4.2 Kompozity s kovovou maticí

Kompozity s kovovou maticí (MMC – metal matrix composites) nejsou proti kompozitům s polymerní maticí v praxi tolik rozšířené a stále se ještě intenzivně vyvíjí. Průmyslové využití těchto materiálů však významně roste, což je dáno celou řadou předností, z kterých lze uvést:

- vyšší pevnost a tuhost,
- vyšší tvárnost a houževnatost,
- vyšší tepelnou odolnost,
- dobrou elektrickou a tepelnou vodivost,
- odolnost proti opotřebení,
- možnost povlakování a svařování s jinými kovy,
- nenasákavost a většinou nehořlavost,
- lepší odolnost proti radiaci,
- MMC nepohlcují ani neuvolňují plyny do okolního prostoru [1, 3, 11].

Nevýhody MMC:

- složitější výroba proti PMC,
- vyšší hmotnost,
- vyšší cena,
- problematická údržba a likvidace MMC [1, 3, 11].

Primárně se kompozity s kovovou maticí nepoužívají pro zvýšení tuhosti nebo pevnosti matrice, ale používají se převážně pro:

- zvýšení teplotního rozsahu použitelnosti kovu,
- potlačení creepu při vyšších teplotách,
- snížení závislosti mechanických vlastností na teplotě,
- zvýšení ořezuvzdornosti,
- snížení hmotnosti v porovnání s čistým kovem,
- zvýšení rozměrové stability (snížení teplotní roztažnosti) [3].

Kovovou maticí mohou být slitiny hliníku, které jsou v praxi nejrozšířenější, a to díky velmi dobrému poměru pevnosti k hmotnosti a velmi dobré elektrické a tepelné vodivosti. Využívají se převážně v leteckém a automobilovém průmyslu. Slitiny titanu se jako matrice používají z důvodu vyššího poměru pevnosti k hmotnosti proti hliníkovým, i když je jejich hustota zhruba dvojnásobná, a také pro vyšší teplotní odolnost. Používají se převážně slitiny Ti6Al4V, Ti3Al25V nebo čistý titan. Pro aplikace, kde je vyžadována vysoká pevnost a odolnost proti vysokým teplotám, se uplatňují niklové slitiny [1, 2, 3].

Vlastnosti některých druhů kovových matic jsou uvedeny v tabulce 1.12.

Tab. 1.12 Vlastnosti kovových matic [11].

Báze matrice	Značka slitiny	Vlastnost		
		Hustota [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Al	AlCu4Mg	2 770	490	70
	AlZn4Mg1	2 720	380	70
	AlMgSi	2 700	320	70
Ti	TiAl6V4	4 430	910	112
	TiV13Cr11Al13	4 510	880	116
	TiMo11Zr5Sn5	5 060	1 370	105
Ni	Hastelloy X	8 950	850	240
	Udimet	7 900	1 520 - 2 330	220
	Nimocast 258 40 % W	12 450	920	305

Převážná většina všech kompozitních materiálů s kovovou maticí (více než 75 %) jsou částicové kompozity sestávající z hliníkové matrice a z částic SiC nebo Al₂O₃. Tyto se používají převážně pro součásti motorů, brzd a dalších dílů v automobilovém a leteckém průmyslu (obr. 1.12), v elektrotechnickém průmyslu aj.

Jako další příklady lze uvést: niklové slitiny s částicemi ThO₂, HfO₂ nebo ZrO₂ pro potlačení creepu, ocelová matrice s částicemi Al₂O₃, CrO₂ nebo ThO₂ pro reaktorovou techniku k potlačení křehnutí oceli neutrony, stříbrná matrice s částicemi CdO nebo SnO₂ pro kontakty v elektrotechnice, měděná matrice s částicemi Al₂O₃, BeO nebo ThO₂ pro svářecí elektrody, ocelová matrice s částicemi TiB₂ pro zvýšení tuhosti a snížení hmotnosti namáhaných částí raketoplánů, apod [3].



Obr. 1.12 Výfukový systém ze slitiny Hastelloy X [20].

Vláknové MMC jsou většinou tvořeny maticemi z hliníkové nebo titanové slitiny s vyztužením spojitými nebo nespojitými dlouhými vlákny, zpravidla s jednosměrným uspořádáním. Jako vyztužující vlákna jsou používána převážně bórová vlákna na wolframovém nosiči (B/W), karborundová vlákna na uhlíkovém nosiči (SiC/C), whiskery SiC, uhlíková vlákna a korundová vlákna (Al₂O₃). Tabulka 1.13 zobrazuje vlastnosti běžných kompozitů s kovovou maticí [3].

Tab. 1.13 Vlastnosti MMC [3].

Kompozit	Vlákna	Matrice	Objemový podíl vláken [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
B/Al	kontinuální	AlMg1SiCu (6061), T6	50	1 500	210
SiC/Al	kontinuální	AlMg1SiCu (6061), T6	50	1 450	200
SiC/Al	krátká	AlCu4Mg1.5 (2024), T6	20	650	110
C/Al	kontinuální	AlMg1SiCu (6061), T6	40	550	300
Al ₂ O ₃ /Al	krátká	AlMg1SiCu (6061), T6	20	370	97

1.4.3 Kompozity s keramickou maticí

Kompozity s keramickou maticí (CMC – ceramic matrix composites) jsou lehké a velmi tvrdé, zároveň však velmi křehké. Vynikají svou žárupevností, která předčí i slitiny niklu. V kombinaci s keramickými vlákny mají vysokou pevnost a také výbornou tepelnou a chemickou odolnost. Dobrou lomovou houževnatost dosahují v kombinaci s výztuží z kovových vláken (např. W nebo Mo), které se dokáží plasticky deformovat. Výroba kompozitů s keramickou maticí je však náročná a není v současné době tak rozšířená [2, 11].

CMC se vyrábí se za účelem:

- zvýšení houževnatosti keramické matrice,
- zvýšení pevnosti v tahu a potlačení závislosti pevnosti keramické matrice na druhu namáhání a na rozměrech součásti,
- zvýšení otěruvzdornosti v extrémních podmínkách,
- zvýšení teplotní odolnosti v extrémních podmínkách,
- zlepšení obrobitelnosti keramické matrice [3].

Pro částicové kompozity se používá převážně matrice SiC, u které lze zvýšit houževnatost přebytkem křemíku. Tyto materiály nachází využití pro výrobu raket a raketových motorů. Disperze částic Si a C v matrici SiC poskytuje kompozitu odolnost proti tepelným šokům a vysokou odolnost proti otěru za vysokých teplot. Takový materiál je znám jako Hexoloy KG SiC. Disperze částic extrémně tvrdého TiB₂ dává kompozitivnímu materiálu maximální odolnosti proti otěru a používá se např. na výrobu trysek tryskacích strojů – materiál Hexoloy ST SiC [3].

U kompozitů s krátkými vlákny bývá matrice z keramiky Al₂O₃ nebo ZrO₂ a vyztužující fáze nejčastěji ze SiC whiskerů. Výsledný materiál dosahuje vysoké pevnosti v tahu i tlaku, a to za normální i zvýšené teploty. Vyztužujícími whiskery se zvyšuje odolnost proti creepu a erozi a snižuje koeficient tření. Snížení creepu a zvýšení lomové houževnatosti lze docílit u keramických matic z oxidické nebo neoxidické keramiky přidáním disperze z krátkých vláken, např. SiC, Si-Ti-O-C, Al₂O₃, Si₃N₄ aj. [3].

Mezi keramické matrice se řadí i matrice uhlíková, ta je vyráběna z polotovaru s plastovou maticí metodami běžnými pro PMC a následně grafitizována. Do matrice jsou zabudována uhlíková nebo grafitová vlákna a následná grafitizace zamezí jejich degradaci. Takové kompozity, nazývané kompozity C/C, jsou používány pro nejnáročnější aplikace, např. pro náběžné hrany raketoplánů. V následující tabulce jsou uvedeny jejich základní vlastnosti [3].

Tab. 1.14 Vlastnosti kompozitů C/C [3].

Disperze	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Houževnatost [kJ·m ⁻²]
Grafit - částice	10 - 15	40 - 60	110 - 200	0,07 - 0,09
Usměrněná vlákna	120 - 150	600 - 700	500 - 800	1,4 - 2,0
3D vlákna	40 - 100	200 - 350	150 - 200	5 - 10

Rovněž kompozity se skleněnou maticí jsou řazeny mezi CMC pro velmi podobné vlastnosti. Disperze v těchto materiálech je tvořena částečnou krystalizací matrice, jejich velikost bývá v řádu desetin mikrometru a objemově tvoří 40 – 50 %. Takové materiály se nazývají sitaly nebo sklokeramika a vyrábí se pomocí těchto metod:

- tepelným zpracováním skla – tato metoda patří mezi nejstarší a principem je dlouhodobé zahřívání skla nad teplotu odskelnění, při němž se přeměňuje amorfní struktura a uvnitř skla vznikají drobné krystalické částice,
- řízeným ochlazováním skloviny, při níž dochází k pomalému ochlazování skloviny, která částečně zkrystalizuje,

- spékáním skleněného prášku, při kterém tento částečně krystalizuje [3].

Kromě běžných oxidů ve skle obsahují některé typy kompozitů také Li_2O , který zapříčiňuje přednostní krystalizaci minerálu Spodumen ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) se záporným koeficientem tepelné roztažnosti a výsledný kompozit tak má téměř nulovou tepelnou roztažnost. S objemovým podílem těchto krystalů ve výši 80 % získá kompozit odolnost vůči tepelným šokům až do teploty 800 K a propouští přitom přes 80 % infrazářením. Tyto typy kompozitních materiálů jsou používány např. na sklokeramické varné desky kuchyňských kombinovaných sporáků (obr. 1.13) nebo astronomická zrcadla [3].



Obr. 1.13 Sklokeramická varná deska [21].

Kombinací skloviny a rohože se spojitými vlákny lze získat kompozit schopný nahradit speciální druhy ocelí v různých aplikacích. Použitím borosilikátového skla může výsledný materiál dosáhnout teplotní odolnosti až do 500 °C a užívá se na výrobu různých podložek a držáků při výrobě skla nebo hliníku. Jako vyztužující fáze mohou být použita karborundová (SiC) nebo uhlíková vlákna (C). Například kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny dosahuje vysoké tepelné vodivosti a v rovině vláken je elektricky vodivý. V tabulce 1.15 jsou vlastnosti těchto materiálů [3].

Tab. 1.15 Vlastnosti CMC [3].

Materiál	C ocel	Sklo	Sklo + SiC	Sklo + C
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7 800	2 200	2 900	2 000
Pevnost v tahu [MPa]	600	50	450	500
Modul pružnosti v tahu [GPa]	210	63	110	130
Tažnost A [%]	10	0,1	1	1
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	40	1,1	3	1,5

Kompozit s maticí z čistého křemenného skla a 80 % objemovým podílem částic MoSi_2 vyniká odolností proti oxidaci, která se téměř rovná platině, vysokou elektrickou vodivostí a odolností proti tepelným šokům. Používá se jako odporový materiál pro vysokoteplotní aplikace – např. topné elementy – i díky jeho teplotní stálosti do 1400 °C [3].

1.5 Technologie výroby kompozitů

V současné době existuje celá řada výrobních technologií a postupů, kterými lze zpracovat kompozitní materiály. Pro volbu konkrétní technologie je třeba zvážit řadu aspektů:

- velikost dílu, jeho geometrii a objem produkce,
- kompatibilitu matrice, výztuže, aditiv, příp. dalších vstupních materiálů,
- výrobní cenu, požadovanou životnost a kvalitu povrchu dílu,
- cenu výrobních přípravků a jejich životnost,
- pořizovací cenu výrobní technologie.

Podle povahy lze výrobní technologie rozdělit na tyto základní kategorie: otevřený systém, tlakový systém, vstřikování, reaktivní systém, kontinuální proces, případně další. Technologický postup pro výrobu dílu zahrnuje mimo jiné operace přípravy matrice a výztuže, prosycení výztuže, vytvarování polotovaru a jeho vytvrzení a opracování vytvrzeného polotovaru do finálního výrobku. Kromě matrice, reakčních činidel a výztuže mohou do procesu výroby vstupovat další materiály, jako gelcoaty, plniva, aditiva, pigmenty, stabilizátory, retardanty hoření atd. [6, 8, 11].

1.5.1 Ruční laminace

Ruční laminace (nebo také kontaktní laminace, ruční kladení apod.) je nejjednodušší a zároveň nejstarší výrobní technologií pro zpracování kompozitů. Charakteristickým rysem je použití pouze spodní formy (A formy), do které se laminuje. Tato technologie je vhodná pro malé série dílů v počtu jednotek až stovek ks za rok.

Na formu připravenou k výrobě (tj. již naseparovanou) je v první fázi nanese vrstva gelcoatu, která brání prorýsování struktury výztuže na pohledovou plochu dílu. Gelcoat může být tzv. primer, jehož povrch je určen k další operaci pro dosažení finálního povrchu (např. lakováním), nebo finální gelcoat, který může být probarven do jakékoliv barvy a tvoří na výrobku pohledovou a odolnou vrstvu. Gelcoat je možné aplikovat pomocí štětce nebo stříkací pistole, přičemž aplikací pomocí stříkací pistole se dosáhne rovnoměrnější vrstvy. Na zpolymerovaný gelcoat se nanáší výztuž ve formě rohože nebo tkaniny. Pokud je vyžadována zvýšená kvalita povrchu dílu, aplikuje se na vrstvu gelcoat tzv. povrchová rohož. Jednotlivé vrstvy rohože nebo tkaniny se prosycují pryskyřicí pomocí plyšového válečku a pomocí kovového válečku s drážkováním se důkladně vyválněčují za účelem zhutnění a odstranění nežádoucích vzduchových bublin. Aplikuje se tolik vrstev, kolik je potřeba pro dosažení požadované tloušťky. Vylaminovaný díl se následně nechává při pokojové teplotě vytvrdit. Vytvrzení může být urychleno přidáním urychlovače, teplem nebo např. ultrafialovým zářením [6, 8, 22].

Výhody ruční laminace spočívají v jednoduchosti výrobního procesu, jednoduchosti výrobních forem, nízkých nákladech na výrobní pomůcky, ve variabilitě používaných materiálů a téměř neomezených možnostech tvaru a velikosti dílu. Nevýhodou jsou dlouhé výrobní časy a tím pádem vyšší ceny dílů a nízká produktivita, dále pouze jeden pohledový povrch, vysoká závislost na zkušenostech a schopnostech pracovníka a velké množství odpadu [6, 16].

Na obrázcích 1.14 a 1.15 jsou zobrazeny operace nanášení výztuže, prosycení výztuže pryskyřicí a válečkování.



Obr. 1.14 Aplikace výztuže (vlevo), prosycení výztuže pryskyřicí (vpravo).



Obr. 1.15 Válečkování.

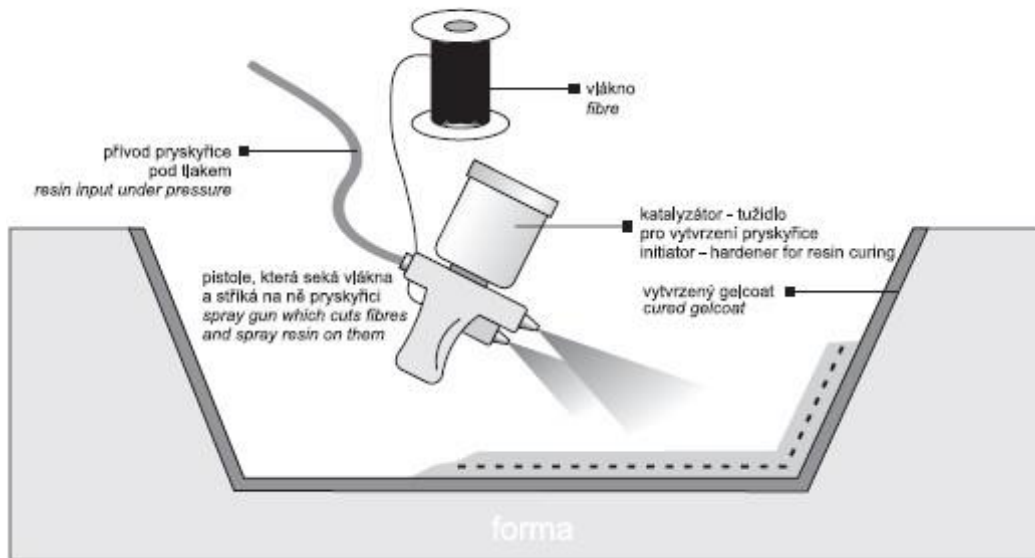
Laminování do otevřené formy umožňuje vlamínovat různé sandwichové materiály a jádra, které zvyšují pevnost a tuhost finálního výrobku a snižují jeho váhu. Jako jádra se používají pěnové materiály (PUR, Airex), materiály na bázi dřeva (balsa, překližka), kartonové a polypropylenové voštiny, textilní objemové výztuže (Coremat), apod. [6].

1.5.2 Stříkání

Technologie stříkání laminátu je obdobou ručního laminování s tím rozdílem, že je materiál nanášen stříkací pistolí, ve které se mísí pryskyřice se sekanými vlákny. Stejně jako u ruční laminace, je i u této technologie v první operaci na jednodílnou formu nanesen gelcoat. Proces zhutnění a vytěsnění vzduchových bublin se provádí stejným způsobem, tedy za použití kovových drážkovaných válečků. Produktivita je vyšší proti ruční laminaci, ale vyšší jsou i vstupní investice do zařízení. I u této technologie platí silná závislost kvality dílu na zkušenostech pracovníka [6, 8].

Touto technologií se vyrábí např. lodě, vany, sprchy, exteriéry rekreačních vozidel aj., a díly je rovněž možné vyztužit sandwichy či jádry [6]. Obrázek 1.16 zjednodušeně znázorňuje princip technologie.

Stříkání/ *spray-up*



Obr. 1.16 Stříkání laminátu [23].

1.5.3 Resin transfer moulding (RTM)

Princip technologie RTM spočívá ve vstřikování pryskyřice do uzavřené formy (spodní forma + víko) za použití tlaku. Technologie je vhodná pro série v řádu stovek a tisíců kusů za rok. Rozlišujeme lehké RTM (light RTM) a těžké RTM (heavy RTM). Lehké RTM využívá pro výrobu lehčích konstrukcí forem bez vyhřívání převážně vyráběných z laminátů a pryskyřice je vstřikována pod menším tlakem, zatímco díly z těžkého RTM se vyrábí většinou na kovových formách se zabudovaným vyhříváním pro urychlení procesu vytvrzení a pryskyřice je vstřikována pod větším tlakem. Rozdíly jsou v produktivitě, která je u těžkého RTM vyšší, ale i ceny výrobních forem jsou několikanásobně vyšší proti technologii light RTM.

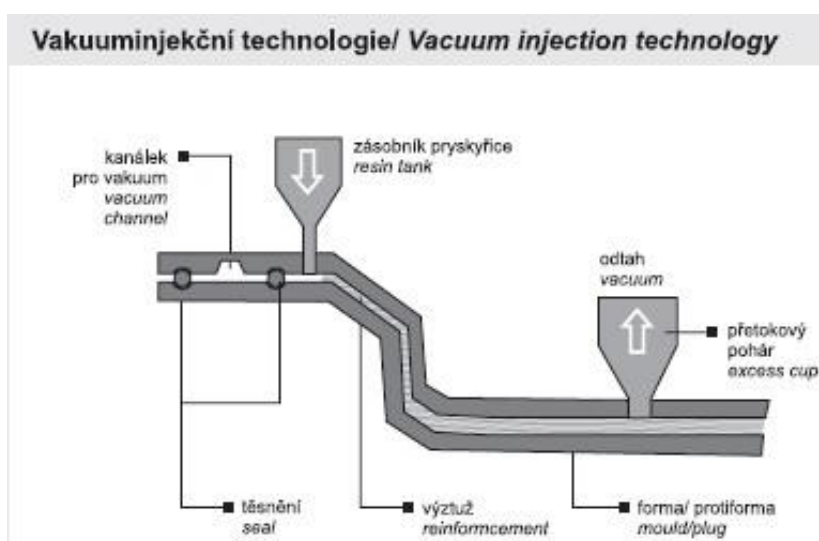
Pracovní postup začíná jako u ruční laminace nanesením gelcoatu do spodní formy. Po zavaznutí gelcoatu se do formy založí objemová rohož, která je předem nastříhaná dle šablony do tvaru kopírujícího povrch dutiny. Následně je na spodní formu nasazena horní část formy (víko nebo B forma) a přisáta pomocí vakua. Pryskyřice je pod tlakem vstřikována speciálním zařízením přes plnicí hadici, dokud nevyplní dutinu formy. Stav naplnění je kontrolován jednak téměř průhledným víkem, jednak natečením pryskyřice odtokovými otvory do přetokové nádoby. Po vytvrzení je díl z formy vytažen a dokončen.

Výhody této technologie jsou relativně nízká vstupní investice, dobrá kvalita finálních výrobků, oboustranně dobrý povrch, dobrá reprodukovatelnost a možnost vlamínování jader nebo jiných výztuh. Nevýhodou je nižší obsah skla proti jiným technologiím, proto se díly nepoužívají jako nosné prvky, ale např. jako kryty různých konstrukcí (autobusů, zemědělských a stavebních strojů, apod.). U heavy RTM je nevýhodou potřeba těžkých a drahých kovových forem [8, 16].

Na obrázku 1.17 je zobrazeno založení objemové výztuže a plnění pryskyřice a na obr. 1.18 je schématické zobrazení.



Obr. 1.17 Založení objemové výztuže (vlevo), injektáž pryskyřice (vpravo).



Obr. 1.18 Schéma RTM [23].

1.5.4 Mokrý lisování

Mokrý lisování využívá principu založení výztuže do spodní formy, která se zalije pryskyřicí, forma se uzavře víkem za pomoci vakua nebo mechanicky pomocí upínek a díl se nechá vytvrdit. Rozlišujeme tzv. studené lisování, které probíhá bez přívodu tepla, a lisování za tepla, které je realizováno ve vytápěné formě. U této technologie je důležité přesné nařezání výztuže tak, aby vyplnila celou dutinu formy [8, 22].

Formy pro výrobu technologií studeného lisování jsou většinou vyrobeny z plněných pryskyřic, oproti tomu pro lisování za tepla se používají formy ocelové. Studené lisování se používá pro menší díly, kde je nezbytné dodržet rozměry a tloušťku dílu a zároveň není možné na víko umístit plnicí a odtokové kanály. Povrch dílů je dobrý z obou stran, přičemž každá strana může být natřena jinak barevným gelcoatem [8, 22].

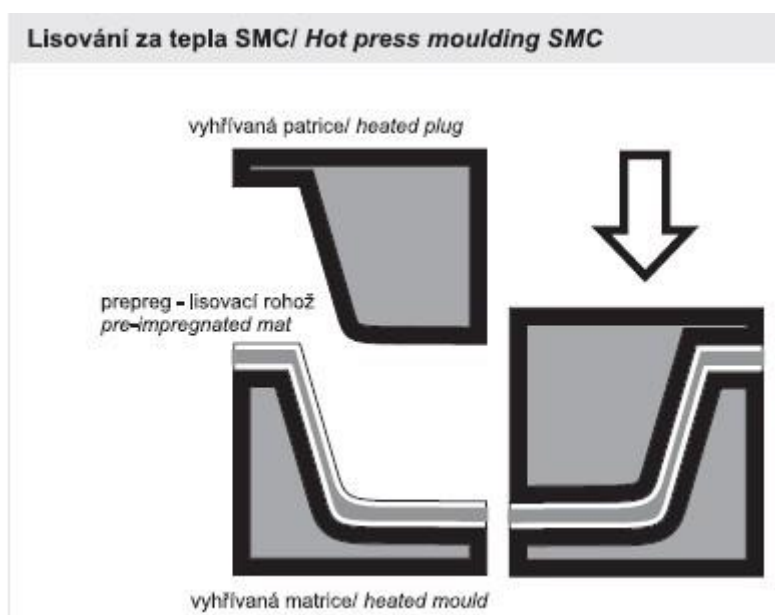
Na obr. 1.19 je zobrazeno založení výztuže do formy a uzavření formy pomocí upínek.



Obr. 1.19 Studené lisování – příprava výztuže (vlevo), mechanické uzavření formy (vpravo).

1.5.5 Sheet molding compound (SMC)

Technologie SMC (obr. 1.20) je založena na vysokotlakém lisování plošných lisovacích materiálů, tzv. prepregů, za použití tepla. Jedná se o vysoce produktivní metodu pro výrobu dílů převážně pro automobilový průmysl a nákladní vozidla, kdy objem výroby je v řádu desetitisíců ks za rok. Výrobní cykly jsou velmi krátké a obvykle trvají jen několik minut, v některých případech i desítky sekund [6].



Obr. 1.20 Technologie SMC [23].

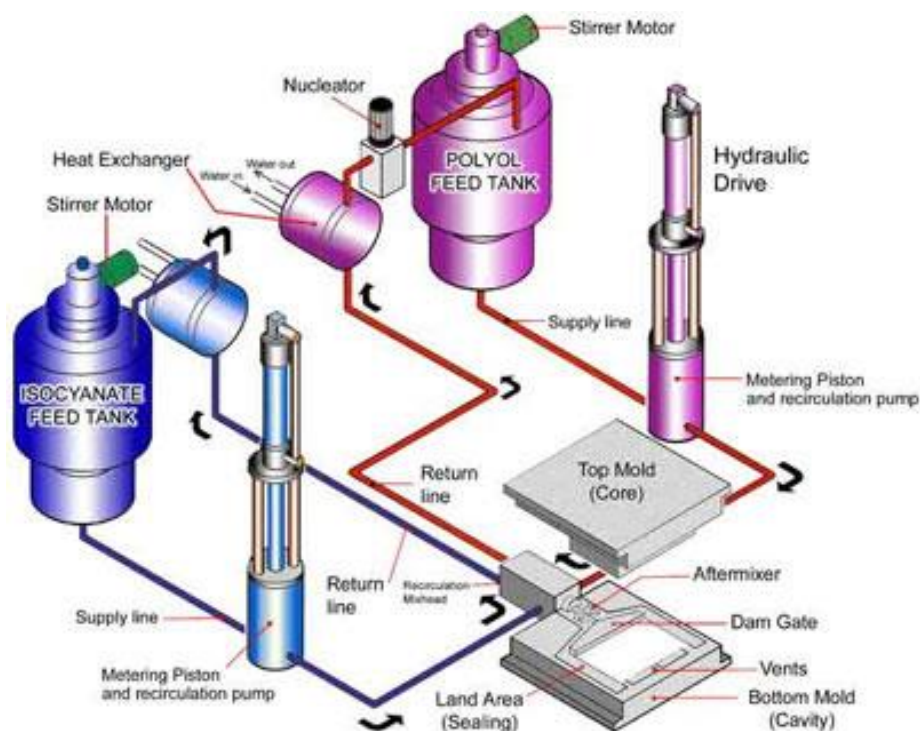
Lisování předimpregnovaných plošných výztuží probíhá na hydraulických lisech ve vytápěných ocelových formách. V závislosti na složení a požadované zatékavosti se mohou lisovací tlaky pohybovat mezi 30 a 140 bary. Lisovací tlaky navyšují požadavky na vyšší obsah plniv nebo výztuže, větší tloušťku nebo velké žebrování. Lisovací teploty leží v rozmezí 130 až 160 °C. Přířezy rohože jsou připravovány ručně nebo za použití řezačky. Podle váhy vylisku a přídatku na přetoky je možné určit potřebné množství výztuže. Rychlost lisování se volí s ohledem na zamezení porušení skleněných vláken. Viskozita lisovací hmoty se musí nastavit vhodně za účelem zatékání pojiva ve formě spolu se skleněnými vlákny [8].

Pro SMC lisování se používají ocelové vyhřívané formy s pochromovaným a vyleštěným povrchem za účelem dosažení kvalitního povrchu výrobku. Vyhřívání forem je řešeno elektricky, olejem, vodou nebo párou, z nichž nejpoužívanější jsou vyhřívání olejem a párou a to z důvodu, že poskytují rovnoměrný a levný ohřev. Odformování výrobků je řešeno mechanickými vyhazovači nebo stlačeným vzduchem. Finální povrch dílů může dosáhnout vysoké kvality povrchovou úpravou, která je aplikována již v průběhu lisování, jde o tzv. IMC (in-mould-coating) [8].

Nevýhodou této technologie jsou vysoké ceny nástrojů a forem, ale hlavně velmi vysoké ceny lisů, proto se vyplatí pouze pro velké výrobní série (desítky tisíc kusů). Omezujícím faktorem pro maximální velikost vyráběných dílů je velikost lisu [16].

1.5.6 Reaction injection molding (RIM)

Reakční vstřikování obnáší spojení dvou tekutých složek v míchací hlavě stroje a následné vstříknutí směsi do uzavřené formy (viz obr. 1.21). Obvykle se jedná o komponenty polyol a isokyanát, které chemicky zreagují ve formě, zpolymerují a vytvrdí se. Mísení obou složek probíhá za vysokého tlaku (cca 24 MPa), zatímco tlaky ve formě dosahují cca 345 kPa. RIM vyžaduje levnější formy a lisy než např. technologie injekčního vstřikování. Avšak reakční vstřikování vyžaduje přísnější kontrolu procesů, a sice z důvodu, že reakce se musí nastartovat přesně v okamžiku, kdy je dutina formy vyplněná směsí, parametry procesu musí být konzistentní pro každý zdvih. Hlavní výhodou při zpracování je nízká viskozita obou komponent – polyolu a isokyanátu, která umožňuje zpracování komplexních dílů [6].



Obr. 1.21 Technologie RIM [24].

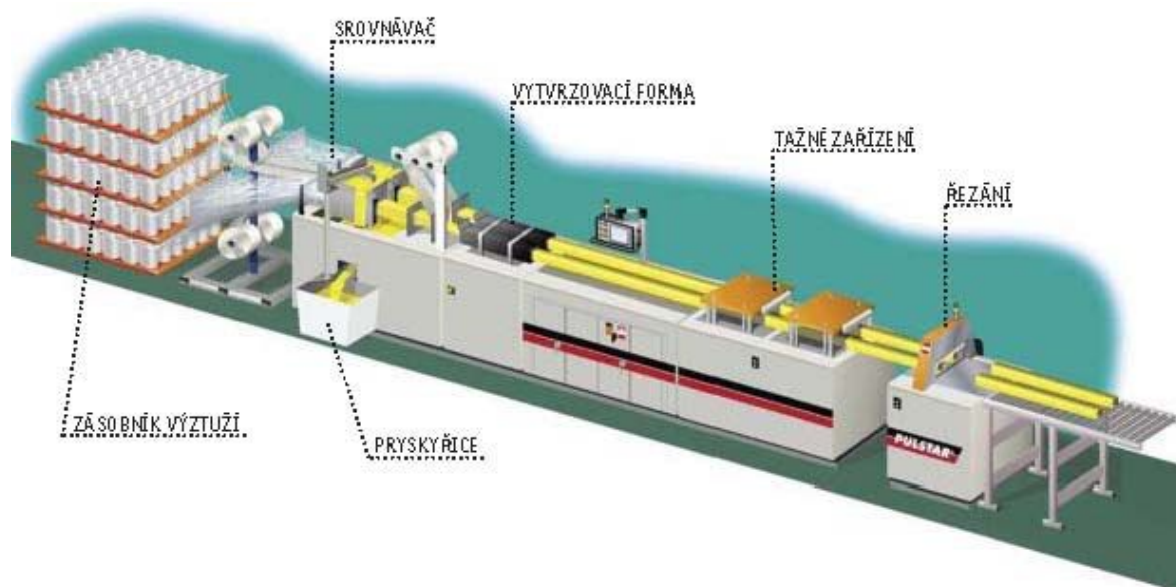
Dvě rozdílné verze reakčního vstřikování zahrnují vyztužující fáze. Jednou z nich je tzv. Reinforced reaction injection molding (RRIM), jehož podstatou je

vstřikování výztuže přímo z míchací hlavy s ostatními složkami. Výztuha bývá většinou ve formě drceného skla nebo skleněných vloček a před samotným smícháním složek v míchací hlavě je přidávána buď do jedné nebo do obou složek. To má za následek zvýšení modulu pružnosti v ohybu, zlepšení teplotní odolnosti a pro některé aplikace i zlepšení kvality povrchu [6].

Druhou verzí je tzv. Structural reaction injection molding (SRIM), kde vyztužující fáze je umístěna přímo do formy a smíchaná pryskyřice se v tu chvíli stává matricí výztuhy, která je již v dutině formy. Výztuhou je obvykle předlisovaná rohož nebo výlisek s usměrněnými vlákny. Tyto formy výztuže odolávají proudění nebo pohybu vláken, které jsou zapříčiněné tlakem vstřikované pryskyřice. SRIM se používá pro velkoplošné díly automobilů a kamionů [6].

1.5.7 Pultruze

Pultruze je kontinuální proces, při kterém se vyrábí ploché, příčně nebo podélně zvlněné nekonečné pásy s konstantním průřezem (obr. 1.22) [8].



Obr. 1.22 Schéma pultruze [25].

Při výrobě jsou využívány různé formy spojitých vláken, jako jsou rovingy, rohože, tkané rovingy, tkaniny nebo plátna. Pro docílení hladkého povrchu jsou používány speciální fólie s povrchovou úpravou. Vlákna typicky prochází lázní z pryskyřice, kde jsou prosycena. Poté, co jsou zbavena přebytečné pryskyřice, prochází srovnávačem, kde jsou narovnána, aby mohla být ve vytvrzovací formě vytvarována do požadovaného profilu. Přes vytvrzovací tunel je tažné zařízení dopraví do řezacího zařízení, které profily krátí na požadovanou délku. Pultruze umožňuje vyrábět kromě profilů mnoha různých průřezů, např. tvaru písmen I, L, U, čtvercové profily, obdélníkové, kruhové, a řady dalších, také dřevěná, pěnová, ocelová a jiná jádra obalená kompozitním materiálem [6].

Převážná většina výztuží používaných pro kontinuální laminaci jsou skleněná vlákna. Používají se však i vlákna uhlíková a aramidová. Z matric jsou nejběžnější polyesterová a vinylesterová pryskyřice. Typickými aplikacemi, kde jsou využívány výrobky z pultruze, jsou bezpečnostní žebříky a příčky, rošty, nevodivé nosiče kabelů

a nosníky v korozivním prostředí. Touto technologií se také vyrábí hnací hřídele automobilů a například konstrukční rámy pro vesmírné orbitální satelity [6].

Výhody pultruzní technologie spočívají v téměř neomezené variabilitě průřezů, nekonečné délce vyráběných profilů, vysoké produktivitě a vysokém stupni automatizace, minimálních nárocích na lidskou práci aj. Jako nevýhody lze zmínit vysoké investiční náklady na technologii, relativně drahý provoz a nezbytnost mít kvalitní řídicí systém [16].

2 VÝROBA SKLOLAMINÁTOVÉHO DÍLU

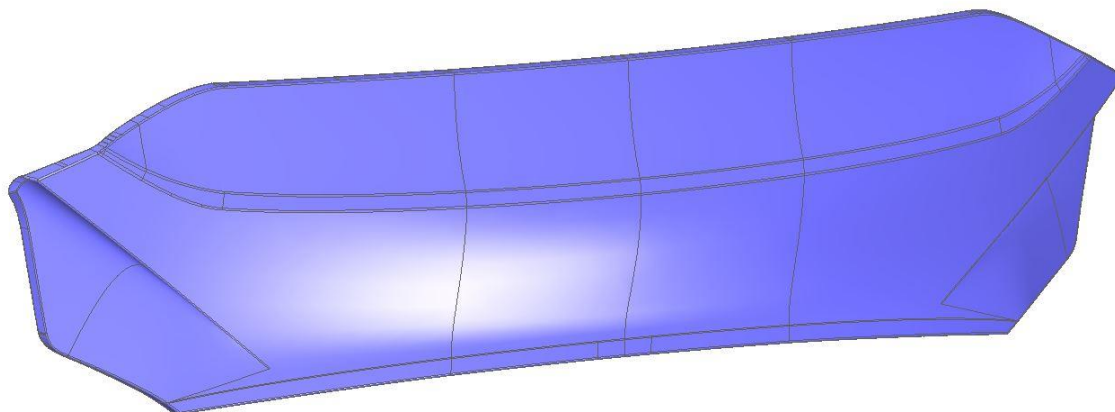
V této kapitole bude na konkrétním díle analyzována vhodnost výroby dílu vybranou technologií v porovnání s jinými technologiemi. Budou vytvořeny 3D data modelu a výrobní formy včetně výkresové dokumentace a technologický postup pro výrobu dílu. Dále budou navrženy některé testy pro ověření mechanických vlastností a bude popsán způsob měření dílu.

2.1 Popis dílu

Jako díl, na kterém bude popsán kompletní postup výroby, byla vybrána přední maska autobusu, viz obr. 2.1. Výkres dílu je přílohou č. 2 této práce. Jedná se o sklolaminát (skleněná výztuž + nenasyčená polyesterová pryskyřice), na který budou v budoucnu lepeny ocelové zálisky, aby mohla být kompletní sestava namontována zákazníkem na autobus.

Díl bude plnit funkci pohledového krytu, na který bude nalepeno logo výrobce autobusu. Bude výklopný, aby byl umožněn přístup k některým provozním kapalinám, pro seřízení kinematiky stěračů apod.

Díl bude vyráběn ve 2 variantách – ve finálním gelcoatu v odstínu RAL 9010 nebo bude lakován v odstínu dle požadavku zákazníka. Roční produkce bude činit zhruba 50 ks.



Obr. 2.1 Přední maska.

2.2 Posouzení vhodné výrobní technologie

Vybraný díl bude posuzován z hlediska vyrobiteľnosti a nákladovosti ve 3 možných výrobních technologiích – SMC, RIM a RTM. Životnost projektu je uvažována cca 7 let, tzn. po této době by měl zákazník představit nový design autobusu.

2.2.1 SMC

Základním předpokladem pro výrobu dílu technologií SMC je pořízení výrobní technologie za cca 35.000.000 Kč. Výrobní forma pak stojí cca 1.000.000 Kč. Cena dílu je zalkulována i s rozpočítáním ceny formy v tabulce 2.1 níže.

Tab. 2.1 Cena dílu SMC

Přípravek	Cena
Forma	1 000 000 Kč
Forma celkem	1 000 000 Kč

Cena dílu SMC		
Materiálové náklady	Verkid PG27-H160	245 Kč
Materiálové náklady celkem		245 Kč
Pracnost	Laminace	67 Kč
	Broušení	195 Kč
	Dokončení	41 Kč
Pracnost celkem		303 Kč
Výrobní cena celkem		548 Kč

Cena formy / 1 ks	2 857 Kč
Výrobní cena dílu s rozpočítáním formy	3 405 Kč

Výrobní cena dílu i s rozpočítáním ceny formy činí 3.405 Kč. Jako součást formy není uvažována technologie IMC (in-mould-coating), je tedy nutné počítat ještě s náklady na lakování dílu, které odhaduji na 1.000 Kč.

2.2.2 RIM

I pro tuto technologii je základním předpokladem investice do pořízení technologie ve výši cca 15.000.000 Kč. Cena výrobní formy činí cca 600.000 Kč. V tabulce 2.2 je zobrazena kalkulace ceny dílu i s rozpočítáním ceny formy. Proti ceně dílu v SMC technologii je cena významně nižší.

Tab. 2.2 Cena dílu RIM

Přípravek	Cena [Kč]
Forma	600 000 Kč
Forma celkem	600 000 Kč

Cena dílu RIM		
Materiálové náklady	Telene 1650 A/BK	277 Kč
Materiálové náklady celkem		277 Kč
Pracnost	Laminace	25 Kč
	Broušení	195 Kč
	Dokončení	41 Kč
Pracnost celkem		261 Kč
Výrobní cena celkem		538 Kč
Cena formy / 1 ks		1 714 Kč
Výrobní cena dílu s rozpočítáním formy		2 252 Kč

V tomto případě činí výrobní cena dílu i s rozpočítáním ceny formy 2.252 Kč. Také v případě technologie RIM je nutné počítat ještě s náklady na lakování dílu, které odhaduji na 1.000 Kč.

2.2.3 RTM

Pro technologii RTM v současné chvíli nejsou potřebné žádné investice. Cena formy činí cca 107.000 Kč. Detailní kalkulace ceny dílů je uveden v tabulce 2.3.

Tab. 2.3 Cena dílu RTM

Přípravek	Cena [Kč]
Model	42 800 Kč
Forma A	24 000 Kč
Forma B	40 800 Kč
Forma celkem	107 600 Kč

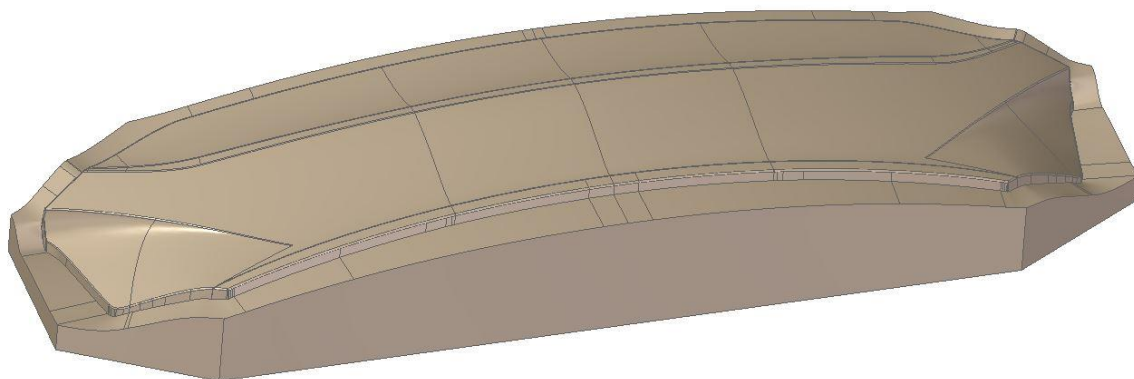
Cena dílu RTM		
Materiálové náklady	Gelcoat	181 Kč
	Barrier coat	110 Kč
	Butanox M50	5 Kč
	Akperox ER33	14 Kč
	AC 23	4 Kč
	Samozhášivá	368 Kč
	Rovicore 300	78 Kč
	Prášková rohož 600 g	33 Kč
	Triaxiální tkanina	58 Kč
Materiálové náklady celkem		851 Kč
Pracnost	Laminace	659 Kč
	Broušení	195 Kč
	Dokončení	161 Kč
Pracnost celkem		1 015 Kč
Výrobní cena celkem		1 866 Kč
Cena formy / 1 ks		307 Kč
Výrobní cena dílu s rozpočítáním formy		2 173 Kč

2.2.4 Vyhodnocení variant

Porovnáním všech tří variant jednoznačně vychází nejlépe varianta č. 3, tedy výrobní technologie RTM. Nejen, že kalkulovaná cena dílu je nejnižší, navíc nejsou potřeba žádné vstupní investice pro pořízení technologie. Velkou výhodou je určitě i fakt, že se jedná o nám známou technologii. Návrh výroby dílu bude tedy realizován pro technologii RTM.

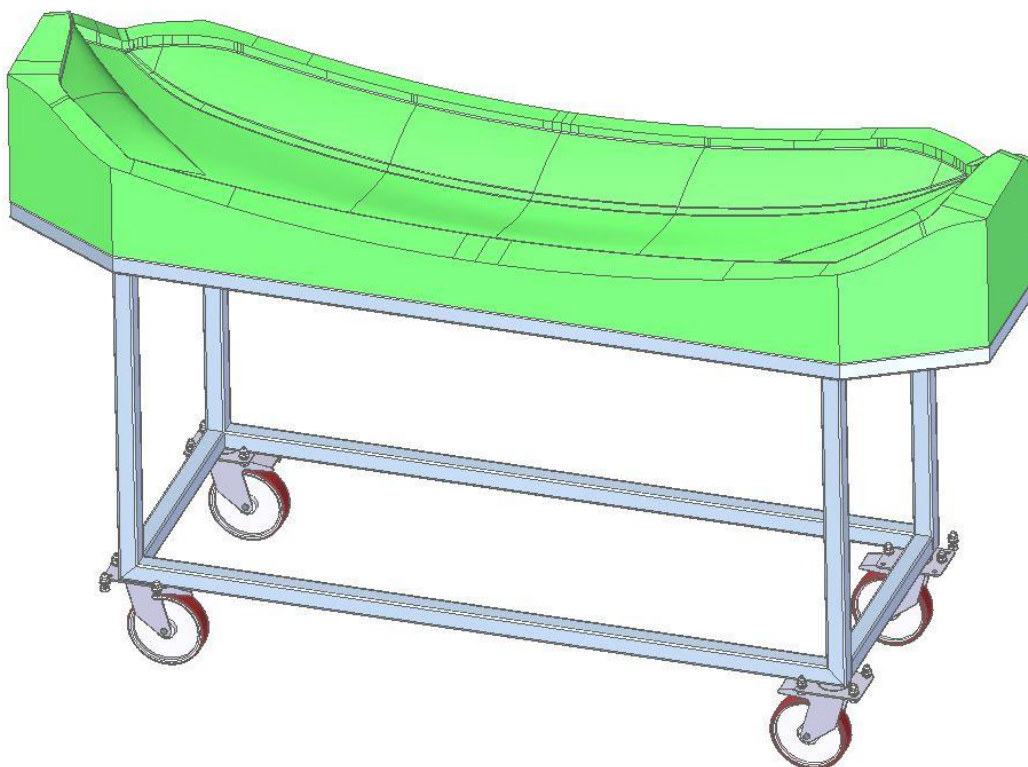
2.3 Výroba dílu

První fází při zahájení nového projektu je příprava 3D dat pro výrobu modelu, viz obrázek 2.2. výkres modelu je přílohou č. 3 této práce. Finální data jsou následně zasílána externímu dodavateli, který zkontroluje správnost dat a pokud je shledá jako vyhovující, zahájí přípravné práce pro vyfrézování modelu z MDF.

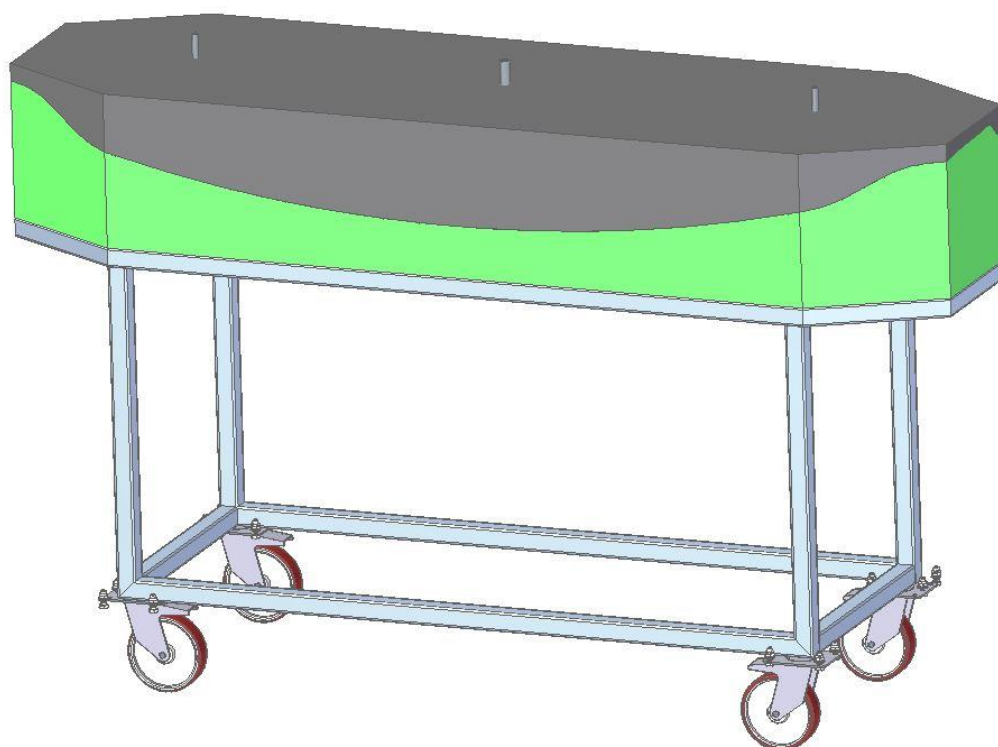


Obr. 2.2 Tvorba 3D dat modelu.

Na modelu se laminuje výrobní forma, proto je nutné vytvořit i 3D data formy, viz obrázky 2.3 a 2.4. Výkres formy je přílohou č. 4 této práce.



Obr. 2.3 3D data spodní formy.



Obr. 2.4 3D data kompletní formy.

Po vyrobení formy bude vyroben první vzorový výrobek dle technologického postupu, viz příloha č. 5 této práce.

ZÁVĚR

Kompozitní materiály jsou v dnešní době tak rozsáhlým tématem, že není možné je v rámci jedné práce zcela popsat a toto téma vyčerpat. Proto jsem se zaměřil na kompozity, které jsou v technické praxi nejpoužívanější a popsal jejich vlastnosti, příklady použití a možné způsoby výroby. Pro konkrétní díl jsem vytvořil 3D data modelu a formy včetně výkresů a sestavil technologický postup pro výrobu prvního dílu.

Hlavním cílem bylo vypracování komplexního návrhu technologie sklolaminátového dílu vozidla na úrovni podrobného technologického postupu včetně popisů testů a měřících metod pro ověřování jakostních parametrů. Součástí cíle diplomové práce bylo zaměření se na vypracování dokumentace nástroje a technicko-ekonomického zhodnocení.

V rámci diplomové práce nebyl cíl zcela naplněn a pro jeho úplné splnění jsou nutná další podrobná a přesná teoretická a praktická bádání. Za velice přínosné ve své práci hodnotím vypracování 3D dat modelu a formy pro výrobu sklolaminátového dílu a sestavení technologického postupu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
2. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
3. DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
4. GRAYSON, Martin. *Encyclopedia of composite materials and components*. New York: J. Wiley & Sons, 1983. ISBN 0-471-87357-8.
5. DANIEL, Isaac M. a Ori ISHAI. *Engineering mechanics of composite materials*. New York: Oxford University Press, 1994. ISBN 0-19-509738-6.
6. BERINS, Michael L. *Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc.* 5th ed. New York: Chapman and Hall, 1991. ISBN 0-412-99181-0.
7. HUMÁR, Anton. *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů: teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie*. Brno: Vutium, 2004. ISBN 80-214-2740-X.
8. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
9. MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
10. LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-704-3273-X.
11. MÍŠEK, Bohumil. *Polymery, keramika, kompozity*. Brno: Vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-214-0521-X.
12. VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340.
13. LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Pavol ALEXY, Ernest GONDÁR a Viera KHUNOVÁ. *Polymérne konštrukčné materiály* [online]. 2012 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf>.
14. SOJKA, Jaroslav a Petra VÁŇOVÁ. *Základy progresivních konstrukčních materiálů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2578-6.
15. MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu - 4. část: Polymery a kompozity s polymerní maticí*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
16. JANČAŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: VUT v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
17. Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. *Havel Composites* [online]. 2010 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.havel->

composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html.

18. Zakázková výroba. *Www.provaznictvi.eu* [online]. 2012 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.provaznictvi.eu/zakazkova-vyroba-lan.html>
19. GAY, Daniel a S. V. HOA. *Composite materials: design and applications*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 1-4200-4519-9.
20. Aerospace. *Weldmac Manufacturing Company: Professionals in metal fabrication* [online]. 2012 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.weldmac.com/aerospace.html>
21. Varné desky. *Mora: Radost domova* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.mora.cz/varna-deska-vds-620-ff/>
22. COMPOSITE COMPONENTS, a. s. *Obecný popis procesu*. Firemní materiál, Choceň, 2008, 5 s.
23. Technologie, jejich popis a schémata. *Havel Composites* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
24. Technology. *PURMOLD* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.purmold.com/purphp/technology.php>
25. Technologie výroby: Pultruze (tažení). *Prefa kompozity* [online]. 2015 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/pultruze-tazeni/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	%	tažnost
Al	-	hliník
Al ₂ O ₃	-	oxid hlinitý
Al(OH) ₃	-	hydroxid hlinitý
AF	-	aramid fibre (aramidové vlákno)
B	-	bór
Be	-	beryllium
BeO	-	oxid beryllnatý
B ₄ C	-	karbid bóru
BCl ₃	-	chlorid bóritý
BMC	-	bulk molding compound
BN	-	nitrid bóru
C	-	uhlík
Ca	-	vápník
CdO	-	oxid kademnatý
CF	-	carbon fibre (uhlíkové vlákno)
CMC	-	ceramic matrix composites
Co	-	kobalt
Cr	-	chrom
CrO ₂	-	oxid chromičitý
Cu	-	měď
CVD	-	chemical vapour deposition
E	MPa	modul pružnosti v tahu
EP	-	epoxidová pryskyřice
Fe	-	železo
GF	-	glass fibre (skleněné vlákno)
GRP	-	glass reinforced polyester (sklolaminát)
HfO ₂	-	oxid hafničitý
HDT	-	tvárová stálost za tepla
HM	-	high modulus (vysokomodulové uhlíkové vlákno)
HS	-	high strength (vysokopevnostní uhlíkové vlákno)
IM	-	intermediate modulus (středněmodulové uhlíkové vlákno)
IMC	-	im-mould-coating
Li ₂ O	-	oxid lithný
MA	-	metakrylátová pryskyřice
MMC	-	metal matrix composites
Mg	-	hořčík
Mg(OH) ₂	-	hydroxid hořečnatý
Mo	-	molybden
MoSi ₂	-	silicid molybdenu
Ni	-	nikl
PA	-	polyamid
PAN	-	polyakrylonitril
PE	-	polyethylen
PF	-	fenolická pryskyřice

PEEK	-	polyéteréterketon
PEI	-	polyéterimid
PES	-	polyétersulfon
PMC	-	polymer matrix composites
PP	-	polypropylen
PPS	-	polyfenylensulfid
PPTA	-	polyfenylentereftalamid
R_m	MPa	pevnost v tahu
RIM	-	reaction injection molding
RRIM	-	reinforced reaction injection molding
RTM	-	resin transfer molding
SiC	-	karbid křemíku
Si ₃ N ₄	-	nitrid křemičitý
SiO ₂	-	oxid křemičitý
SMC	-	sheet molding compound
SnO ₂	-	oxid cíničitý
SRIM	-	structural reaction injection molding
ThO ₂	-	oxid thoričitý
Ti	-	titan
TiB ₂	-	borid titanu
TiC	-	karbid titanu
UHM	-	ultra high modulus (ultra vysokomodulové uhlíkové vlákno)
UHS	-	ultra high strength (ultra vysokopevnostní uhlíkové vlákno)
UP	-	nenasyčená polyesterová pryskyřice
VE	-	vinylesterová pryskyřice
VLS	-	vapour liquid solid
W	-	wolfram
WC	-	karbid wolframu
W_o	MPa	modul pružnosti v ohybu
Y ₂ O ₃	-	oxid yttritý
Zr	-	zirkonium
ZrO ₂	-	oxid zirkoničitý
a_{cN}	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	vrubová houževnatost
a_{cU}	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	rázová houževnatost
α_l	K^{-1}	součinitel teplotní roztažnosti
η	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	viskozita
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	tepelná vodivost
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	hustota
σ_M	MPa	pevnost v tlaku
σ_o	MPa	pevnost v ohybu
σ_{Pt}	MPa	mez pevnosti v tahu

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Vlastnosti laminátů z UP vyztužených skleněnými vlákny.
- Příloha 2 Výkres dílu Přední maska.
- Příloha 3 Výkres modelu pro díl Přední maska.
- Příloha 4 Výkres formy dílu Přední maska
- Příloha 5 Technologický postup dílu Přední maska

Příloha 1 – Vlastnosti laminátů z UP vyztužených skleněnými vlákny [8].

Podíl skleněných vláken (hm. %)	-	Nevyztužená pryskyřice	30-35	40-45	50-55	50-55	55-60	60-70	70-75	
										Rohož (r.a.) ¹⁾
Středně viskozní, vysoce reaktivní UP na bázi ortoftalové kyseliny										
Vlastnosti (23 °C, 50 % r.v.)	Jednotka									
Hustota při 20 °C ρ	kg·m ⁻³	1 220	1 500	1 580	1 700	1 700	1 760	18 880	1 980	
Tažnost A	%	2,0	3,5	3,3	2,4	3,5	3,7	3,4	2,7	
Pevnost v tahu R_m	Mpa	60	120	160	210	300	320	340	630	
Modul pružnosti v tahu E	Mpa	4 800	11 000	12 400	16 000	17 000	20 000	27 000	33 000	
Pevnost v ohybu σ_o ²⁾	Mpa	90	200	250	270	360	320	420	420	
Modul pružnosti v ohybu W_o	Mpa	4 000	10 000	12 000	15 000	16 000	19 000	25 000	30 000	
Pevnost v tlaku σ_M	Mpa	160	160	160	170	170	200	290	230	
Rázová houževnatost a_{cU} ³⁾	kJ·m ⁻²	9	280	300	350	360	370	380	390	
Vrubová houževnatost a_{cN} ³⁾	kJ·m ⁻²	1,2	200	240	-	-	-	-	-	
Tepelná vodivost λ	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0,19	0,22	0,24	0,27	0,27	0,28	0,29	0,43	
Souč. teplotní roztažnosti α_l	K ⁻¹	100-150·10 ⁻⁶	28·10 ⁻⁶	25·10 ⁻⁶	20·10 ⁻⁶	20·10 ⁻⁶	15·10 ⁻⁶	12·10 ⁻⁶	8·10 ⁻⁶	

1) r.a. - rozpustná apretura, n.a. - nerozpustná apretura.

2) Tříbodové uložení.

3) Normované zkušební těleso 80 x 10 x 4 mm.