

Vliv výrobní technologie na mikrostrukturu a vlastnosti vybraných vláknových kompozitů

Bc. Jaroslav Šerák

Diplomová práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Jaroslav Šerák
Osobní číslo: T20041
Studijní program: N0788A270002 Výrobní inženýrství
Specializace: Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů
Forma studia: Kombinovaná
Téma práce: Vliv výrobní technologie na mikrostrukturu a vlastnosti vybraných vláknových kompozitů

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku mikrostruktury a vlastností kompozitních materiálů.
2. Výrobní technologie, princip, význam, aplikace v oblasti výroby vysokopevnostních kompozitů.
3. Zrealizujte experimentální výrobu vláknových kompozitů pomocí zvolených výrobních technologií.
4. Experimentálně vyhodnoťte mikrostrukturu pomocí optických metod.
5. Závěr a diskuse dosažených výsledků.

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

Seznam doporučené literatury:

- BARBERO, E. J.: Introduction to composite materials design, Third edition, 2018, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.
- ŠUBA, O.: Mechanika polymerů a kompozitů, Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, ISBN 978-80-7454-015-8.
- ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s., ISBN 978-80-7318-948-8.
- EHRENSTEIN G. W.: Polymerní kompozitní materiály, Praha, SCIENTIA v Praze, 351s, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6.
- LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konštrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.
- SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 9781842654910.

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

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

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

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 18. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Jaroslav Šerák

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou mechanických vlastností spojenou a vadami mikrostruktury vláknových kompozitů s ohledem na výrobní technologie. Teoretická část popisuje obecnou charakteristiku kompozitních materiálů, jejich složení a vlastnosti. Dále je práce vztažena pouze na oblast vláknových kompozitů. Je popsáno jejich materiálové složení, možné vady v mikrostruktuře a druhy mechanických poškození. Nakonec jsou popsány zpracovatelské technologie, jejich princip, význam a aplikace v oblasti výroby. Praktická část je experimentálního charakteru, jsou vyrobeny zkušební vzorky vybranými technologiemi. V experimentu je vyhodnocována mikrostruktura a mechanické vlastnosti. Po dosažení výsledků je realizován jejich rozbor a vyhodnocení.

Klíčová slova: vláknové kompozity, mikrostruktura, technologie, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the issue of mechanical properties associated with defects in the microstructure of fiber composites with respect to production technologies. The theoretical part describes the general characteristics of composite materials, their composition and properties. Furthermore, the work relates only to the area of fiber composites. Their material composition, possible defects in the microstructure and types of mechanical damage are described. Finally, processing technologies, their principle, importance and applications in the field of production are described. The practical part is of an experimental nature, test specimens are made by selected technologies. The microstructure and mechanical properties are evaluated in the experiment. After achieving the results, their analysis and evaluation is performed.

Keywords: fiber composites, microstructure, technology, mechanical properties

Touto cestou bych rád poděkoval paní doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za její odborné vedení, cenné rady, konzultace, čas a trpělivost, které věnovala mé diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za podporu při laboratorních zkouškách a externí společnosti za pomoc při výrobě zkušebních těles.

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
a) I. TEORETICKÁ ČÁST	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY.....	11
2 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	12
2.1 OBECNÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	12
3 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	14
4 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY.....	16
4.1 POSTUP PŘI VÝBĚRU TECHNOLOGIE VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ.....	16
4.2 MATERIÁLY PRO VÝROBU VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ.....	17
4.2.1 Pojiva (matrice).....	17
4.2.2 Aditiva.....	21
4.2.3 Pigmenty.....	21
4.2.4 Plniva.....	21
4.2.5 Separátory.....	22
4.2.6 Produkty z vláken.....	23
5 DRUHY VLÁKEN.....	25
5.1 VLÁKNOVÁ VÝZTUŽ.....	25
5.2 DRUHY BĚŽNĚ POUŽÍVANÝCH VLÁKEN.....	25
6 VADY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	32
7 ZPŮSOBY PORUŠENÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ.....	34
8 MECHANIKA VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ.....	36
8.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI VLÁKEN.....	36
8.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATRICOVÝCH MATERIÁLŮ.....	37
8.3 DRUHY NAMÁHÁNÍ.....	38
8.3.1 Tah.....	38
8.3.2 Tlak.....	39
8.3.3 Smyk.....	39
8.3.4 Ohyb.....	40
8.4 PEVNOST.....	40
8.5 TUHOST (MODUL PRUŽNOSTI).....	41
9 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ.....	42
9.1 RUČNÍ LAMINOVÁNÍ.....	42
9.2 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU.....	44
9.3 NAVÍJENÍ.....	45
9.4 METODA VAKUOVÉHO VAKU.....	46
9.5 STRÍKÁNÍ.....	47

9.6	LISOVÁNÍ ZA STUDENA.....	48
9.7	LISOVÁNÍ POMOCÍ TEPLA A TLAKU.....	49
9.8	VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ (RTM-RESIN TRANSFER MOULDING)	51
9.9	VAKUO-INJEKČNÍ TECHNOLOGIE (VARTM-VACUUM ASSISTED RESIN TRANSFER MOULDING, RTM LIGHT).....	52
9.10	TAŽENÍ (PULTRUZE).....	53
10	SHRnutí TEORETICKÉ ČÁSTI.....	55
b) II.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	56
11	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	57
12	ZPRACOVÁNÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	58
12.1	POUŽITÁ ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA.....	58
12.1.1	Skelná výztuž	59
12.1.2	Epoxidová pryskyřice a tužidlo	60
12.2	VÝROBNÍ POSTUP DESEK	61
12.3	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	63
12.3.1	Zkouška tahem	65
12.3.2	Zkouška ohybem	67
12.4	VIZUÁLNÍ A MIKROSKOPICKÉ POROVNÁNÍ MOŽNÝCH DEFEKTŮ.....	71
	ZÁVĚR.....	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	79
	SEZNAM TABULEK.....	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	82
	PŘÍLOHY:	83

ÚVOD

Kompozitní materiály jsou nepostradatelnými průmyslovými materiály již několik desetiletí po celém světě. Jejich široká škála využití se postupně vnesla do všech oblastí lidské výroby, přes vojenské aplikace, automobilový průmysl, výrobu letadel, potřeb pro sportovce, elektronických komponentů, ale také v oboru lékařství. Drtivá většina průmyslových aplikací je v současné době závislá na polymerních kompozitech vyztužených vlákny, pro nenáročné aplikace a eliminaci nákladů jsou používány především kompozity s částicovou výztuží. K pochopení problematiky chování kompozitních materiálů a jejich správného použití musí být studium těchto materiálů interdisciplinární [1].

Tyto materiály lze zpracovávat od jednoduchého ručního kladení v rámci kusové výroby až po velmi náročné výrobní postupy. Kromě výztužných vláken, která jsou hlavním nositelem mechanických vlastností, je materiál kompozitní matrice stejně významný pro konstrukční uplatnění v technické praxi. Na základě materiálového druhu matrice se rozhoduje o vhodném zpracování při výrobě nových produktů [1].

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál lze obecně chápat, jako kombinaci dvou a více odlišných druhů materiálů. Jedná se tedy o heterogenní materiály složené z více fází, které se vzájemně odlišují zejména v mechanických, chemických a fyzikálních vlastnostech. Základním prvkem kompozitní soustavy je spojitá fáze, která je všeobecně známá pod pojmem matrice, ve které je obvykle uložena nespojitá fáze. Nespojitou fází představuje výztuž, kterou v nejběžnějších případech tvoří vlákna, nebo jiné částice různých druhů materiálů, a většinou vyniká lepšími mechanickými vlastnostmi. Matrice v kompozitní soustavě plní úlohu pojiva, zajišťuje orientaci vláken a je nositelkou fyzikálních a chemických vlastností, zatímco výztuž zajišťuje pevnost a tuhost [3, 8].

Typickým představitelem kompozitního materiálu je železobeton, složený z výztužných ocelových drátů a směsi betonu. Mezi další významné představitele patří asfaltová směs, jež je typicky používána na výrobu pozemních komunikací. Dalším nepostradatelným zástupcem je skelný laminát, který se skládá ze skelných vláken a pryskyřice. V náročných průmyslových aplikacích jsou významnými představiteli kompozity s uhlíkovými nebo aramidovými vlákny. Uplatňují se zejména v automobilovém a leteckém průmyslu, kde jsou požadavky na mechanické vlastnosti materiálů velmi specifické [3, 8].



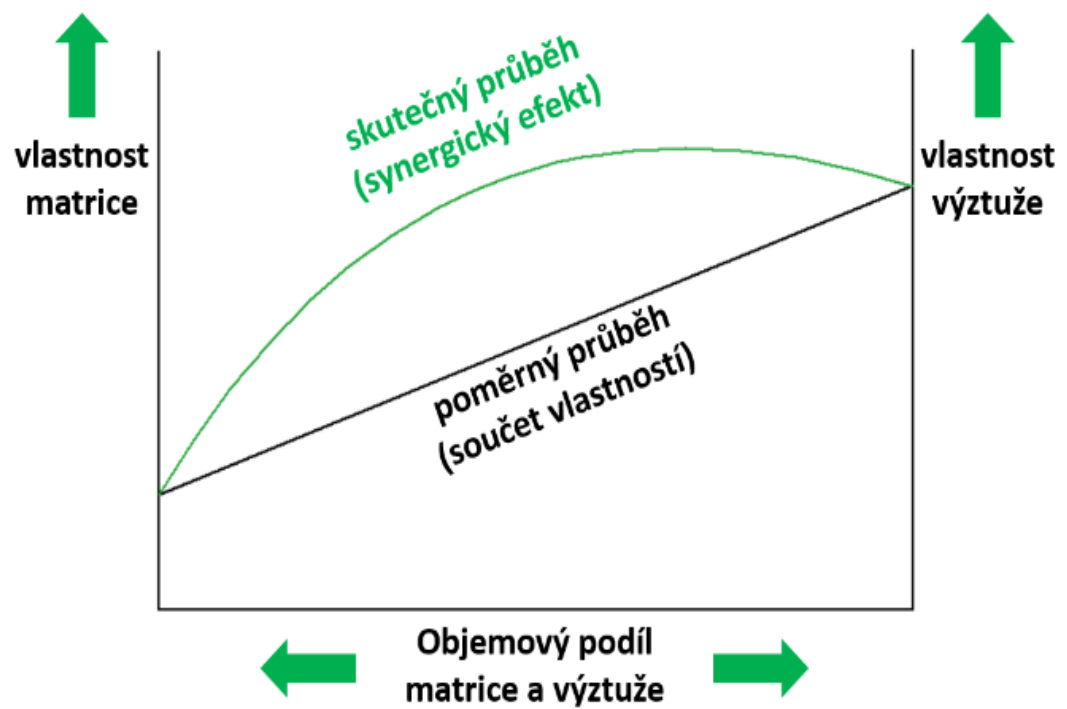
Obrázek 1 Boeing 787 [6]

2 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

2.1 Obecné vlastnosti kompozitních materiálů

Velká výhoda kompozitních materiálů vůči ostatním technickým materiálům tkví zejména v jejich nízké hmotnosti. Oproti tradičním kovům mají i při větším objemu stále výrazně nižší hmotnost, což usnadňuje podstatně lepší manipulaci, přepravu a jiné. Kompozitní materiály se při mechanickém zatížení výrazněji nedeformují, jejich mez elasticity je úměrná mezi pevnosti. Disponují velmi vysokou mezí únavy, jsou spolehlivé a stabilní. V porovnání například s lehkými slitinami kovů jsou kompozitní materiály vysoce ohnivzdorné. Nevýhodou kompozitních materiálů s matricí na bázi epoxidu může být citlivá reakce na ředidla. Jiné běžně užívané procesní kapaliny ve strojích jako jsou například maziva, rozpouštědla, barviva či ropné látky, kompozity nepoškozují. Stárnutí kompozitů je závislé na vlhkosti a teplotě. Nežádoucí vlastností kompozitních materiálů může být jejich nasákavost. Kromě výborných mechanických charakteristik mají kompozitní materiály vynikající odolnost proti korozi, a to i v silně agresivním prostředí. Odolávají UV záření a jsou výbornými tepelnými izolanty. Z dlouhodobého hlediska mají kompozity i barevnou stabilitu [3, 8].

Vlastnosti dané kompozitní soustavy mohou být určeny součtem vlastností složek na základě jejich objemových podílů anebo na sebe složky mohou vzájemně působit synergickým způsobem. Synergický efekt je v podstatě výsledný proces, při kterém dochází v kompozitním materiálu ke kombinaci pozitivních vlastností všech jeho složek tak, že výsledné vlastnosti přesahují poměrný součet vlastností jednotlivých složek. Matematicky jej lze symbolicky vyjádřit nelogickou rovnicí: $1 + 1 = 3$. Užitek vlastnosti kompozitních materiálů závisí tedy především na materiálu výztuže, matrice, ale také na tenkých hraničních vrstvách (mezivrstvách) na rozhraní mezi výztuží a matricí [3, 8].



Obrázek 2 Synergický efekt
v kompozitním materiálu [11]

Pro kompozitní materiály je typické, že většina z nich disponuje velmi silnou anizotropní vlastností. Jsou tak výrazně odlišné od běžných technických materiálů zcela izotropních [3, 9].

3 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozity můžeme rozdělit několika způsoby, například podle vlastností výztuže nebo druhu matrice. Jako kritérium se také používá geometrický tvar, velikost, orientace a rozměry vyztužujících částic [7]. Výztuže se obecně dělí na částicové a vláknové. Vyztužující vlákna se vyznačují tím, že jeden rozměr je výrazně větší oproti zbylým dvěma. Částicové kompozity mají rovnoosý tvar a žádný rozměr výrazně nevyniká. Výztuž u těchto kompozitů značně podporuje přenos napětí, přispívá k lepší tuhosti, ale nepřispívá k růstu tahové pevnosti. Může ale zvýšit tepelnou odolnost a obrobitelnost. Jeden ze základních druhů rozdělení kompozitů je na bázi použité spojité fáze, tzv. matrice, která může být buď kovová, keramická nebo anorganického charakteru. Dalším typem je matrice na bázi polymeru, a to z termosetu, termoplastu či elastomeru [3].

Termosetické pryskyřice se vytvrzují podporou přídavného katalyzátoru, urychlovače nebo aplikací energie ve formě světla a tepla. Po vytvrzení získá matrice finální vlastnosti, které vychází z trojrozměrně zesíťované struktury. Ukazatele tuhosti a pevnosti dosahují vysokých hodnot, ale tyto materiály jsou většinou křehké a málo tažné. Nejvýznamnější předností kompozitů s organickou maticí je synergická kombinace snadné tvarovatelnosti nízko pevného polymeru s tuhostí a pevností vyztužujícího vlákna nebo částice. Viskozita matrice při zpracování musí být dostatečně nízká, aby došlo k dobrému prosycení výztuže. Nevýhoda u neplněných matic je především nízká pevnost, nízký modul pružnosti, malá creepová odolnost a výrazná křehkost [2,7].

Po vytvrzení matrice vzniká tvarově stálý výrobek nazývaný kompozit. Další významné dělení kompozitů je podle geometrického charakteru dispergované fáze do matrice. Částicové kompozity dělíme podle tvaru na pravidelné a nepravidelné. Vláknové kompozity lze rozdělit na dlouhoválnové, krátkoválnové a z hlediska orientace vláken na pravidelné a nahodilé. Vláknové kompozity se dále dělí na jednovrstvé a mnohovrstvé [1, 3].

Rozdělení dlouhoválnových a krátkoválnových kompozitů vychází z délky výztužného vlákna. Je-li délka vláken stokrát větší než jeho průměr, označujeme takové materiály jako dlouhoválnové kompozity se spojitými vlákny. Takto vyztužené kompozity nazýváme také jako jednosměrné nebo rovingy a vyznačují se vysokou pevností ve směru délky vláken a relativně nízkou pevností ve směru kolmém na vlákna. Tyto kompozity jsou vhodné zejména pro aplikace, u kterých je definován směr nejvyššího napětí. Tento anizotropní charakter se často zmírňuje použitím několika vrstev jednosměrného

kompozitu s nahodilou orientací vláken. U krátkovláknových kompozitů je délka vláken menší než stonásobek průměru. V krátkovláknových kompozitech vyztužených diskontinuitními vlákny se projevuje vliv konců vláken, proto jsou jejich vlastnosti závislé na velikosti vlákna [5]. Další možností je využití tkaná splétaných nebo tkaných vláken, která posilují kompozit ve dvou směrech. Tkaná vlákna zlepšují houževnatost a působí proti vzniku trhlin v materiálu. Jejich použití je vhodné v případech, kdy není známý směr zatížení nebo tam, kde není prostor pro jednosměrná vlákna. Aplikace tkaných vláken dodává materiálu ortotropní vlastnosti. Pokud jsou vlákna orientována nahodile jako u vláken koberce nebo nakrátko dělená, jsou mechanické vlastnosti stejné ve všech směrech. Tyto kompozity nazýváme izotropní (trojrozměrné) a jejich vlastnosti nezávisí na směru namáhání [8].

4 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY

4.1 Postup při výběru technologie vláknových kompozitů

Pro samotnou volbu výrobní technologie je potřeba zhodnotit hned několik klíčových faktorů [29].

Samotná volba výrobní technologie je podmíněna charakteru výrobku a vychází z posouzení několika základních kritérií jako je například:

- sériovost výrobku
- rozměry a členitost výrobku
- jakost povrchu
- výsledné požadované vlastnosti
- ekonomické hledisko výroby

Sériovost výrobku

Sériovost je klíčový faktor pro volbu zpracovatelské technologie. Menší série výrobků není totiž ekonomicky výhodné vyrábět strojní technologií, a naopak větší série není efektivní vyrábět ručními metodami [29].

Rozměry a členitost výrobku

Některé technologie umožňují pouze výrobu specifických tvarů, a naopak některé výrobní postupy je možné aplikovat pouze na tvarově jednoduché výrobky [29].

Jakost povrchu

Některé výrobní postupy zaručují pouze jednostrannou kvalitu povrchu z hlediska zaformování [29].

Požadavky na výsledné požadované vlastnosti

Drtivá většina mechanických vlastností je podmíněna obsahem a orientací výztuže a na druhu použité pryskyřice. Toto kritérium je vysoce závislé na zvolené technologii [27, 29].

Ekonomické hledisko výroby

Případný omezený limit nákladů na výrobu nebo míra ziskovosti patří zpravidla k rozhodujícím faktorům [29].

4.2 Materiály pro výrobu vláknových kompozitů

Pro samotnou výrobu kompozitu zvolenou technologií je potřeba několik substancí.

Typické substance reprezentují pojiva, výztuže, aditiva, pigmenty, plniva, separátory, gelcoaty a jiné [29, 34].

4.2.1 Pojiva (matrice)

Kromě termoplastických matric se jako pojiva často používají termosetické pryskyřice, které po vytvrzení tvoří značně zesíťovanou, netavitelnou a nerozpustnou strukturu [29, 34].

Mezi nejpoužívanější pryskyřice bez pochyby patří:

- polyesterové
- vinylestery
- epoxidové

Polyesterové pryskyřice

Na základě své chemické struktury se dělí na:

- ortoftalové
- izoftalové
- tereftalové

V této posloupnosti se obecně zlepšují jejich mechanické vlastnosti, chemická a teplotní odolnost. Lepších vlastností lze dosáhnout aplikací pryskyřic na bázi vinylesterů s teplotní odolností až do 160 °C a výraznou chemickou odolností vůči většině agresivních látek, jako jsou například hydroxidy, kyseliny, nebo rozpouštědla. Pro lepší zpracovatelské podmínky se do pryskyřice přidávají urychlovače, speciální vosky, nebo látky pro snížení viskozity. Za dalším, zejména estetickým účelem se přidávají pigmenty, aditiva, UV stabilizátory a další složky [29].

Epoxidové pryskyřice

Vyznačují se zejména lepšími mechanickými vlastnostmi. Při příměsi tvrdidel lze dosáhnout vyšší teplotní odolnosti až do 180 °C. Nejčastěji se používají pryskyřice na bázi bis-fenolu A a bis-fenolu F. Pro lepší dosažení technologických vlastností se mísí s reaktivními ředidly, to zajišťuje zejména nižší viskozitu. Vhodný výběr epoxidové pryskyřice také pozitivně ovlivňuje pojivový systém, zvyšuje teplotní odolnost a zároveň snižuje hořlavost. Teplotní odolnost matrice se označuje hodnotou T_g – teplota skelného přechodu, to je teplota, pod kterou vytvrzený polymer zůstává v tzv. skelném stavu, makromolekuly jsou pevně fixovány v polymerní síti. V takovém stavu si kompozit zachovává potřebné mechanické vlastnosti, nad touto teplotou do jisté míry měkne a začíná jeho teplotní destrukce, stává se tedy nepoužitelným [33, 27].

Teplotní odolnost lze vyjádřit i hodnotou HDT (heat distortion temperature), tj. mezní teplota, nad níž těleso kompozitu vystavené ohybovému zatížení vykazuje nepřijatelnou deformaci (průhyb). Hodnoty T_g a HDT jsou ukazatelem pro použití kompozitů, které by neměly být z dlouhodobého hlediska vystavovány teplotám, daným hodnotami T_g nebo HDT -20 °C. Zvláštním případem jsou tzv. hybridní pryskyřice, které jsou kombinací běžných polyesterových a polyuretanových pryskyřic [25, 29].

Gelcoaty

Jsou materiály, které slouží zejména k rubovým opravám výrobků. Zejména drobných rýh, prasklin a trhlin. Jsou velmi odolné proti stárnutí, zvětvávání a UV záření [29].

Termoplasty

V rámci výroby kompozitů se z konstrukčních termoplastů nejvíce využívá polyamid a polypropylen. Lze u nich zajistit dobré mechanické vlastnosti, tvarovou stabilitu za tepla, otěruvzdornost a další požadavky v kombinaci přidaných výztužných vláken v množství 20-50 %.

Z hlediska délky vyztužujících vláken se tyto materiály dělí na krátkovláknové (0,6-1 mm) a dlouhovláknové (2-6 mm). V obou případech se dodávají formou granulátů a zpracovávají se technologií injekčního vstřikování, dále na termoplasty vyztužené tkaninami, rohožemi nebo termoplastickými prepregy [29].

Vytvrzovací systémy pro termosetické matrice

Nenasycené polyesterové pryskyřice a vinylestery, kde je síťujícím monomerem styren, se vytvrzují exotermní radikálovou kopolymerací za využití dvojných vazeb v řetězci polyesterových jednotek a styrenu [22, 20].

Potřebnou iniciaci dodávají volné radikály, vzniklé rozpadem peroxidů, které se dávkuje v množství 1-2 dílů na 100 dílů pryskyřice v závislosti na typu pojiva a teplotě. Nejčastěji užívanými iniciátory jsou keton peroxidy (metyletylketon peroxid –MEKP), cyklohexanon peroxid a jejich směsi a dibenzoyl peroxid zejména pro vytvrzování za zvýšených teplot [16, 7].

Peroxidy se zpravidla charakterizují teplotou rozpadu na volné radikály a obsahem aktivního kyslíku. Z hlediska bezpečné výroby, dopravy, skladování a použití se dodávají ve směsi s tzv. flegmatizátory, např. ftaláty, obsah aktivní složky bývá nejčastěji 50-60%.

Pro vytvrzování za normální teploty je třeba přídavku urychlovačů rozpadu peroxidů. Nejběžnější jsou organické soli kobaltu (kobaltnaftenát nebo kobaltoktoát) ve vhodném rozpouštědle – styren nebo nasycené polyestery [15, 29].

Epoxidové pryskyřice se vytvrzují tužidly nebo tvrdidly. Jedná se většinou o polyadiční reakce s lineárními (alifatickými), aromatickými nebo cykloalifatickými aminy, pro získání vyšší teplotní odolnosti se k vytvrzování užívají anhydridy organických kyselin nebo vhodné amidy (např. dikyandiamid). Řídčeji vytvrzování probíhá iontovou polymerací s využitím komplexů BF₃ s aminy, zejména pro rychletvrdnoucí tmely a lepidla [29].

Pro vytvrzování aminy platí obecné pravidlo, že pro získání optimálních vlastností musí vzájemně zreagovat všechny reakční skupiny epoxidové pryskyřice, charakterizované tzv. epoxi-ekvivalentem a všechny odpovídající reakční skupiny tužidla – aminové skupiny – NH. Potřebné množství tužidla lze stanovit podle následujícího příkladu:

Epoxidová pryskyřice má hmotnostní epoxi-ekvivalent 179

Tužidlo má hmotnostní NH ekvivalent 71.

Mísící poměr lze získat dle níže uvedeného vzorce:

$$\underline{100 : 179(\text{epoxi-ekvivalent}) \times 71(\text{NH ekvivalent tužidla}) = 39,66}$$

Po zaokrouhlení tedy připadá pro řádné vytvrzení 100 g epoxidové pryskyřice 40 g tužidla.

Poměr míchání je tedy uváděn jako 100:40 (váhově)

Doba mezi přidáním iniciátoru v případě polyesterů a tužidla v případě epoxidů a počátkem vytvrzovací reakce, charakterizovaném počínajícím vzrůstem viskozity systému, se nazývá dobou zpracovatelnosti směsi [20, 27].

Může se volbou iniciátoru, urychlovače a jejich množství respektive volbou tužidla pohybovat od několika minut do několika hodin (zejména u epoxidů).

Doba zpracovatelnosti směsi je pro danou technologii jedním z určujících faktorů. V některých případech, zejména u polyesterových pryskyřic, je třeba vytvrzovací reakci z technologických důvodů ať už v náběhové nebo vytvrzovací fázi zpomalit. K tomuto účelu slouží tzv. inhibitory[30, 33].

Při vytvrzování pryskyřic dochází k reakčnímu smrštění, se kterým je třeba při konstrukci a výrobě kompozitních dílů počítat. U čisté polyesterové pryskyřice se jedná až o 7% objemového smrštění, u epoxidu je to cca 4%. Tyto hodnoty se snižují u kompozitů se

zvyšujícím se obsahem výztuže a plniv, přidavkem dostatečného množství plniv v kombinaci s vhodnými termoplasty lze smrštění prakticky eliminovat (tento systém se používá u pojivových systémů pro výrobu forem) [35, 23].

Velikost smrštění lze rovněž snížit volbou vytvrzovacího systému – čím pomalejší vytvrzování a nižší exotherm (uvolňování reakčního tepla), tím je nižší konečné smrštění pojiva resp. celého dílce [29].

4.2.2 Aditiva

Jsou podpůrné přísady, které příznivě zlepšují vlastnosti pojiv. Zlepšují smáčivost vláken a plniv pryskyřicí, usnadňují odvzdušnění pryskyřic a gelcoatů, nebo v podobě UV absorberů a antioxidantů zaručují pomalejší stárnutí a degradaci polymerů [29].

4.2.3 Pigmenty

Dodávají pryskyřicím a gelcoatům barevný efekt. Již minimální přídavek pigmentu by měl zaručovat dokonalé barevné krytí, ochranu proti UV záření a dalším vlivům a zaručit tak stabilitu požadovaného odstínu. Používají se pigmenty anorganické (kysličníky kovů), ale v poslední době se již postupně přechází na pigmenty organické, aby se zabránilo znečištění životního prostředí [29].

4.2.4 Plniva

Plniva představují malé a pevné částice materiálů, které se přidávají do směsi za účelem dosažení vyšší pevnosti, tvrdosti, tvarové stability, lepší zpracovatelnosti, dále snižují hořlavost a smrštění. Mezi běžně používaná plniva patří uhličitán vápenatý, kaolin, kysličník hořečnatý, mastek, křemenná moučka, kameninová drť a jiné. Plniva se do směsi přidávají na základě požadovaného účelu v množství 30-400 hm.d. na 100 hm.d. matrice [29].

4.2.5 Separátory

Uspodňují lepší vyjímání kompozitů z forem po vytvrzení. V některých případech slouží jako oddělovací vrstvy v kontinuálních procesech. Separátory lze rozdělit do čtyř hlavních skupin:

- fóliové
- voskové
- semipermanentní
- vnitřní separátory

Fóliové

Mezi typické představitele patří celofán, polyamid, teflon a polyetylen. Ve zvláštních případech se používá i polyvinylalkohol, který je z formy i vylisku snadno umyvatelný [29].

Voskové

Jsou nejčastěji na bázi karnaubského vosku. Dávají výrobku lesk a lze je použít ve více vrstvách. Musí být bez obsahu silikonů, které jsou nežádoucí pro povrchové nátěry [29].

Semipermanentní

Lze je mnohonásobně použít a jsou v drtivé míře na bázi fluoroplastů [29].

Vnitřní separátory

Využívají se hlavně při technologii tažení jako přídavek do pryskyřice, nebo aditivum do SMC prepregů a jiné. Jsou na bázi mastných kyselin a při zpracování za tepla vystupují na povrch a zajišťují jednodušší separaci.

Při aplikaci všech separátorů je důležité dodržovat přesné pokyny výrobců [29].

4.2.6 Produkty z vláken

Příze

Jsou vyrobeny spřádáním z vláken a dále se zpracovávají na tkaniny, pásy atd [29].

Nitě

Jsou složeny z jedné, nebo více přízí, které jsou vzájemně spředené [29].

Rovingy

Jsou to paralelně družené prameny skelných vláken navinuté bez zákrutu. Obvyklý počet elementárních vláken činí 400-1600 [29].

Prepregy

Jedná se o ploché útvary, jejichž hlavní složkou je před-impregnovaná výztuž, která je částečně vytvrzená. Tyto listové polotovary lze na sebe vrstvit do požadované tloušťky a ve formách je pak dotvarovat a dotvrdit působením tepla případně i tlaku [29].

Tkaniny

Tkaniny jsou plošné útvary z pramenců, orientovány do plátnové, keprové nebo atlasové vazby. Přípravují se v různých gramážích od 280 do 1500 g/m². Jemnější tkaniny se vyrábí již od 17 g/ m². Pro speciální účely se vyrábí tkaniny hybridní, jež jsou kombinací více druhů vláken [29].



Obrázek 3 Druhy tkaných vazeb
[11]

Rohože

Vznikají nepravidelným ukládáním 50 mm dlouhých vláken ze sekaných pramenců o různém texu (tex je jednotka, která charakterizuje jemnost vlákna - 1 km vlákna v gramech), spojených práškovým pojivem nebo emulzí. Hmotnost se pohybuje v rozmezí 225 až 900 g/ m². Emulzí spojené rohože se lépe tvarují, jsou měkčí a používají se pro tvarově složitější výrobky [29].

Rohože spojené pomocí prášku jsou tužší a používají se na jednodušší velkoplošné dílce. Specifikem jsou rohože z nekonečných vláken s náhodnou orientací, které si zachovávají stabilitu a při tlakovém prosvycování pryskyřicí technologií RTM [29].

Kombinované výztuže

Spojením pramencových tkanin s rohožemi vznikají kombinované výztuže o celkové gramáži 600-1800 g/m², které snižují pracnost při technologii ručního kladení a uplatňují se také při výrobě velkoplošných forem. Zvláštním případem jsou kombinované výztuže pro vakuoinjekční technologie, které jsou tvořeny sešitím pramencových rohoží s vnitřní řídkou rohoží ze syntetických, řídkěji i skleněných vláken (např. Combiflow, Rovicore), umožňující rychlý tok pryskyřice do celého objemu vsázky suché výztuže [29].

Sendviče

Jsou zvláštním druhem laminárních kompozitů, skládají se ze dvou vnějších vrstev překrývajících mezivrstvu (jádro) z lehkého materiálu. Vnější části jsou tenké, ale tuhé, vnitřní vrstva, tzv. distanční, je tlustší, zpravidla méně pevná hmota [29].

5 DRUHY VLÁKEN

5.1 Vlákenná výztuž

Materiál ve formě vláken se cíleně jako samostatný konstrukční prvek používá zřídka. Pro technické aplikace jsou již předchystány ve formě tkaniny, rovingu apod. [2]. Ve vláknových kompozitech mají vyztužující vlákna o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost v porovnání s pojivovou matricí. Při vnějším namáhání se vlákna deformují méně, než polymerní matrice [5].

Mezi nejrozšířenější vyztužující vlákna pro výrobu kompozitních materiálů patří vlákna skleněná, jejich měřítko zastoupení tvoří okolo 80%.

5.2 Druhy běžně používaných vláken

• Skelná vlákna

Skelná vlákna byla poprvé k výrobě kompozitů použita v roce 1893. A jsou nyní jedny z nejatraktivnějších vláken vzhledem k jejich dobrým mechanickým vlastnostem a nízké ceně [29].

Vyrábějí se tavením sklářského kmene, který je tvořen směsí křemenného písku (v zastoupení cca 70%), dále pak vápence, kolemanitu a potaše. Z hlediska chemického složení se sklářský kmen liší podle typu skla, běžně se však užívá typ E. Jedná se o tzv. bezalkalické sklo 2. hydro-lytické třídy. Teplota tavení sklářského kmene je přibližně okolo 1400 °C. Přímou z taveniny se odtahují elementární vlákna malým otvorem o \varnothing 1-2 mm. Samotný průměr vláken je v rozpětí 5-25 μ m v závislosti na rychlosti odtahu. Přímou pod tavící pecí se vlákna lubrikují pro usnadnění jejich dalšího zpracování. Takto nalubrikovaná vlákna jsou chráněna i před mechanickým poškozením [29].

V dalším sledu se vlákna druží do pramenů a navíjí se na kokony, které jsou určeny k dalšímu zpracování, například pro pramence, tkaniny, rohože atd [29].

Na základě své amorfní struktury jsou skelná vlákna izotropní [29].

Charakteristika vlastností vláken z E-skla o \varnothing 11 μm :

- hustota 2,6 g/cm^3
- pevnost v tahu 3400 MPa
- E modul 73 GPa
- protažení při přetržení 4,8%

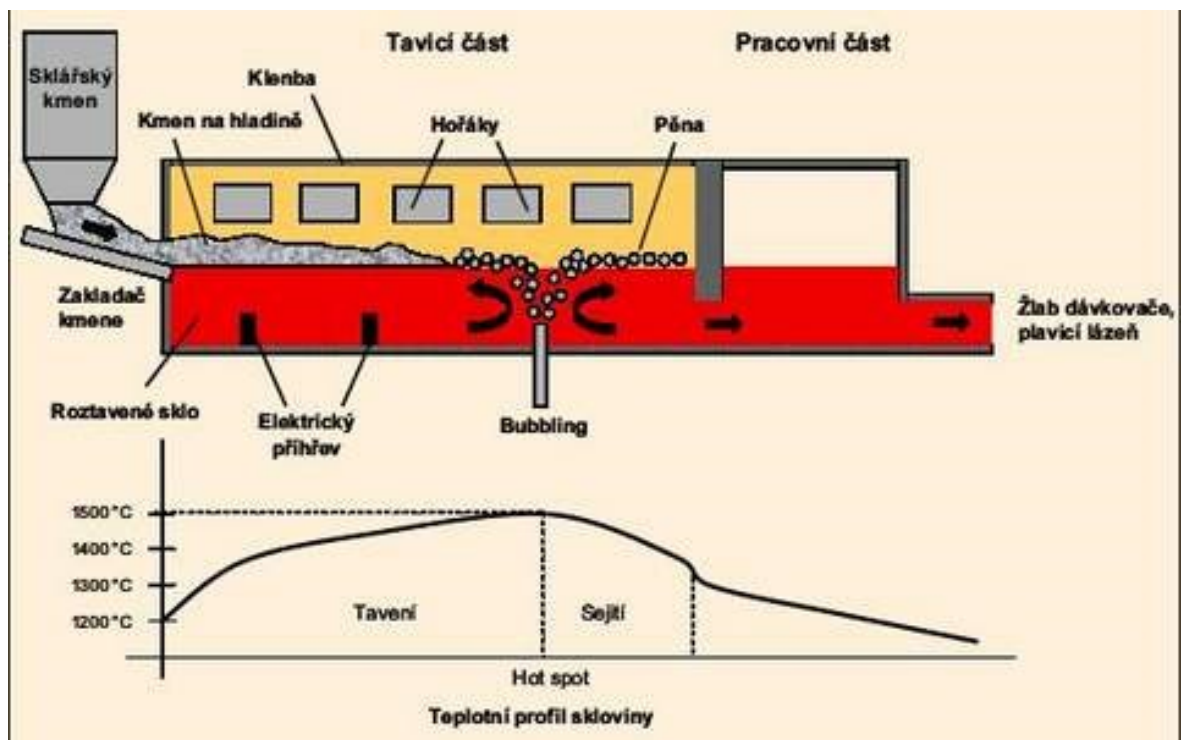


Obrázek 4 Svazek skelných vláken
[18]

Skelná vlákna jsou běžně používanou výztuží v různých aplikacích, a to především kvůli jejich ekonomické dostupnosti. Jejich hlavní výhodou je vysoká pevnost v tahu, vysoká odolnost tlakovému namáhání, odolnost vůči vysokým teplotám a korozi. V neposlední řadě také zajímavý estetický vzhled [11, 19].

	sklo E Saint- Gobain Vertex, a.s.	sklo E údaje z literatury	sklo S	sklo C	sklo ACR	kiemenné sklo
průměr [μm]	5-16	9-13	9-13	9-13		8,9
hustota [g/cm ³]	2,54	2,54	2,49	2,49	2,7	2,19
modul pružnosti [GPa]	73	72,4	85,5	69	75	69
pevnost v tahu [GPa]	2-4	až 3,45	až 4,6	až 3	1,7	3,45
prodloužení [%]	1,8-3,2	4,8	5,7	4,8		5
souč. tepelné roztažnosti	4,9	5	5,6	7,2		
součinitel tepelné vodivosti	1	1	1	1		
teplota měknutí [°C]	800	800	970	750		980
relativní permitivita při frekvenci 1 MHz	5,9-6,4		5-5,4			3,78
ztrátový činitel (tanδ) při 10 GHz		0,0039				0,002

Obrázek 5 Přehled vlastností skelných vláken [12]



Obrázek 6 Výroba skelných vláken taháním z trysek [15]

• Polyesterová vlákna

Polyesterová (PES) vlákna se hojně používají ve filtračních médiích. Polymer se vyrábí polykondenzací ze dvou vstupních substancí. Připravený polykondenzát se zvláknuje z taveniny do šachty, následně dlouží, popřípadě sdružuje do kabelu, který se dále řeže na stříž, nebo trhá na trhanec. Vznikají různě jemná, profilovaná vlákna. Polyester je termoplastický a má relativně velkou pevnost. Polyesterová vlákna mají dobrou odolnost vůči většině minerálních kyselin, vynikající odolnost proti bělicím roztokům a jiným oxidačním činidlům. Polyesterová vlákna velmi dobře odolávají procesu stárnutí, obušování a plísním. Jejich značnou nevýhodou je ztráta pevnosti při dlouhodobém působení slunečního záření [12].

Z hlediska konstrukční aplikace jsou tato vlákna vhodnější než polyethylenová, důvodem je větší odolnost proti teplotám a také vyšší přirozená afinita k matrici. V porovnání s kevlarovými vlákny polyesterová vlákna nenavlhají [13].

• Polyethylenová vlákna

Polyethylenová (PE) vlákna mají poměrně velkou měrnou pevnost a připravují se většinou zvláknováním z gelu a dloužením. Jejich kladné vlastnosti reprezentuje vysoká elasticita, voděodolnost a odolnost proti korozi. Nepolárnost PE vláken zaručuje odolnost vůči většině chemikáliím, výjimku představují pouze silně oxidační roztoky a hydroxid sodný. Polyethylenové vlákno nenavlhá a je odolné proti světelnému UV záření. Houževnatost a odolnost proti otěru je přibližně stejná jako u kevlarových vláken. Výraznou nevýhodou je jejich malá odolnost vůči teplotám [14].

• Polypropylenová vlákna

Významná vlastnost polypropylenu (PP), ze kterého se vlákna vyrábí, je schopnost dlouhodobě odolávat většině kyselinám a alkáliím. Naproti tomu na ně vysoce oxidačně působí chemikálie typu hydroperoxidu, kyseliny dusičné, halogenů atd. Také organická rozpouštědla na bázi chloru. PP vlákna dobře odolávají biologickému působení, jejich nasákavost je vyloučená a nejsou elektricky vodivá. Při zvýšených teplotách dochází však

u PP vláken k silným kontrakcím. Hraniční teplota pro aplikaci vláken je okolo 140 °C [15].

• Polyakrylonitrilová vlákna

Polyakrylonitrilová vlákna mají pevnost a modul pružnosti v tahu výrazně nižší než skelná vlákna. Jejich hlavní výhodou je dostatečná odolnost proti UV záření a chemická odolnost vůči kyselinám, zásadám a anorganickým solím, vynikají relativně nízkou měrnou hmotností a nasákavostí. Nevýhodou je jejich snadná hořlavost a uvolňování jedovatých zplodin [16].

• Polyvinylalkoholová vlákna

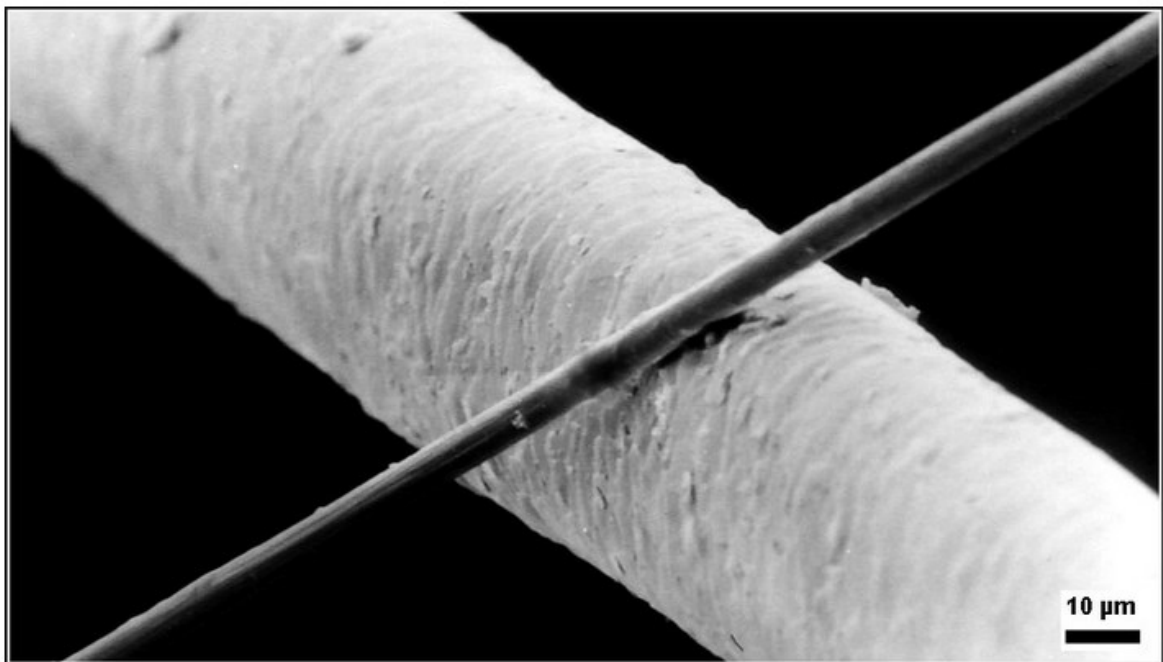
Polyvinylalkoholová (PVAL) vlákna se vyrábí technikou gelového zvlákňování. Takto lze připravit vysoce orientovaná a pevná PVAL vlákna, která mají poměrně slušnou odolnost vůči působení vyšších teplot a vlivům světelného záření. Jejich výhodou je také dobrá odolnost proti UV záření a chemikáliím, nevýhodou je však jejich hořlavost. PVAL vlákna mohou být rozpustná i nerozpustná ve vodě. Hojně se PVAL vlákna využívají ve stavebnictví a jako prvek na výrobu lan. Technický termín pro PVAL vlákna je KURALON [17].

• Kevlarová vlákna

Jejich hlavní výhodou je nízká hustota, velká odolnost proti abrazi a schopnost plasticky se deformovat při kolmém působení na vlákna. Kevlarová vlákna vynikají vysokou pevností v tahu, tepelnou odolností a vysokými moduly. V srovnání se skelnými vlákny mají nízkou elektrickou vodivost, odolávají chemickým látkám a jsou nehořlavé. Struktura vláken je v důsledku silného působení vodíkových můstků vysoce krystalická. Ultrafialové záření kevlarová vlákna značně poškozuje. Mezi jejich nevýhody patří také nízká povrchová energie a spolu s chemickou inertností má za následek nižší mezifázovou adhezi k matrici. Krátká kevlarová vlákna se uplatňují jako výztuž termoplastů (zvláště polyamidů) a pro aplikace, kde jsou požadovány dobré kluzné vlastnosti a vysoká odolnost proti opotřebení např. v brzdových systémech [18].

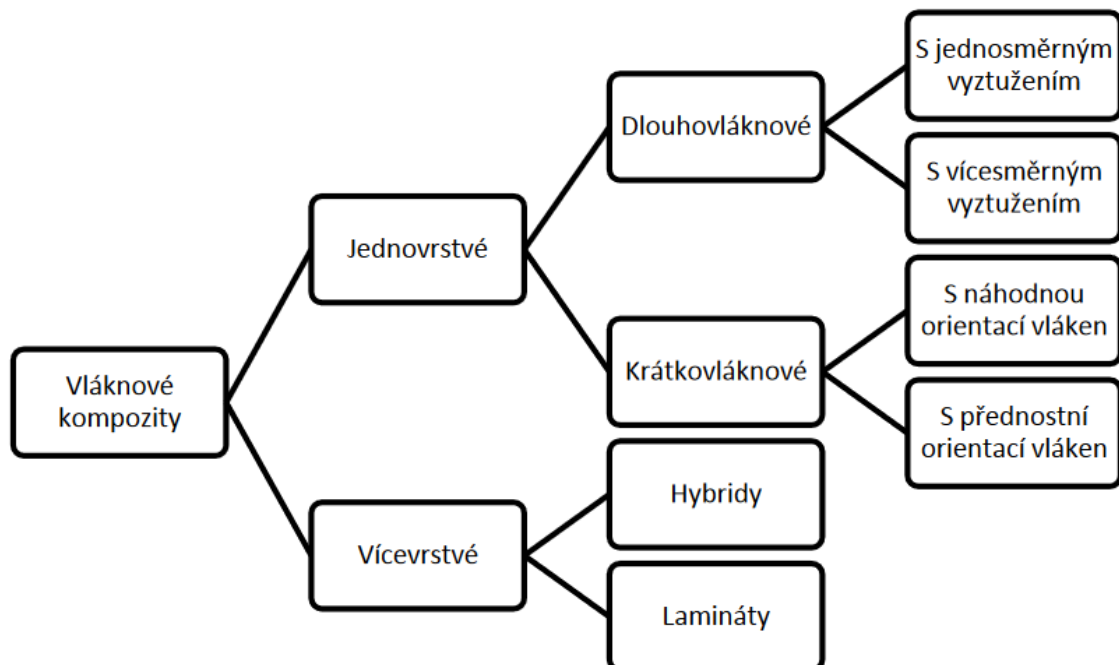
- **Uhlíková vlákna**

Vyrábějí se z viskóзовých nebo polyakrylonitrilových vláken. Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost, modul pružnosti, dobrou tepelnou odolnost a zároveň nízkou měrnou hmotnost. Jsou poměrně finančně nákladné. Velmi dobře odolávají korozi a jsou silně anizotropní. Nejčastěji se dělí podle hodnot modulu pružnosti a pevnosti na vysokopevnostní a vysokomodulová vlákna, která mají nižší tahovou pevnost, ale vysoký modul pružnosti v tahu [5].



Obrázek 7 Uhlíkové vlákno o průměru 6 μm [14]

V dnešní době jsou už více častěji nahrazovány vlákny skelnými, ale pořád své uplatnění nachází v nejrůznějších průmyslových aplikacích, zejména v leteckém a automobilovém průmyslu [10].

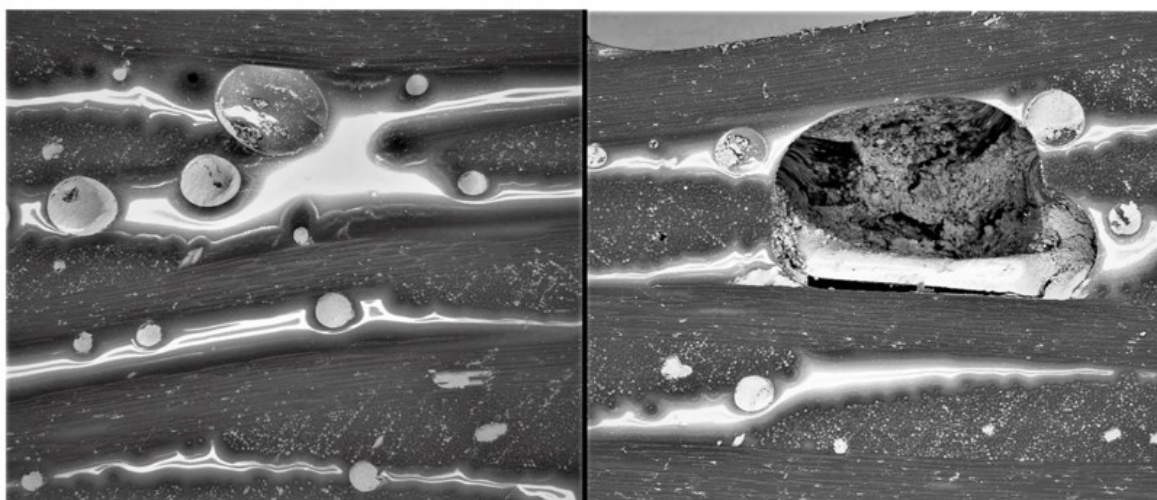


Obrázek 8 Rozdělení vláknových kompozitů dle výztuže [1]

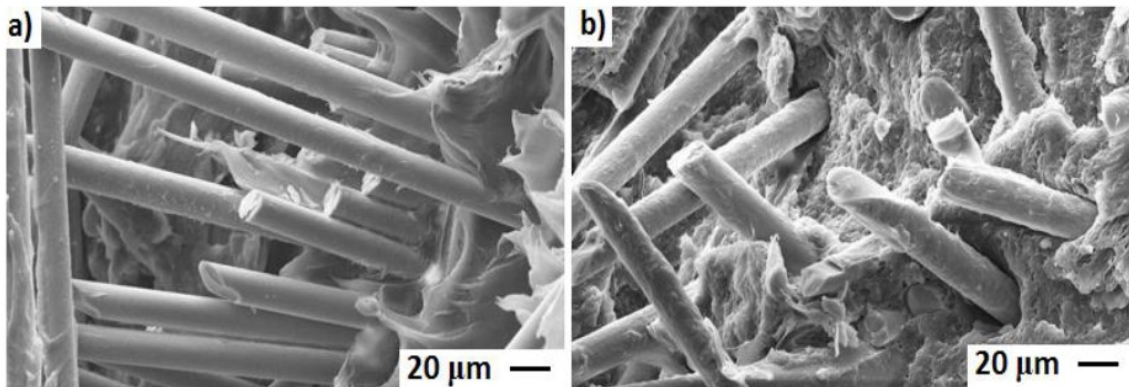
6 VADY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní konstrukce již zohledňuje účel konečného výrobku a jeho podmínky zatížení. Volba způsobu výroby a výroba vláknových kompozitů závisí nejen na jejich příslušné oblasti použití, ale také na typu, materiálu a vlastnostech vláken a matrice. Vady kompozitních materiálů mohou být způsobeny nedodržením technologického postupu při výrobě nebo následně nesprávným použitím kompozitu a degradací materiálů. Vady vláken a matrice mohou být četné, i když nemusí nutně vést ke katastrofickému selhání. Matrice a vlákna mohou být samy o sobě velmi křehké, ale díky synergickému efektu poskytuje spojení vláken a matrice určitou odolnost proti křehkému selhání. Šíření trhlin ve směru kolmém k vláknům je sníženo na rozhraní matrice-vlákna a mění směr podél tohoto rozhraní. Tento proces je umocněn povrchovou úpravou vláken v případě křehkých matic s nízkým celkovým přilnavost matrice k vláknu [10].

Nejčastějšími defekty v mikrostruktuře kompozitů polymerních vláken jsou nejen dutiny, ale také otvory, póry a praskliny. Dutiny jsou vytvářeny dvěma základními mechanismy. To zahrnuje slabou vazbu mezi maticí a vlákny, a proto může dojít k protahování vláken z matrice. To je slabá vazba mezi jednotlivými maticemi vedoucí k delaminaci. [1, 3, 5, 9]



Obrázek 9 Mikroskopické znázornění defektů v kompozitním materiálu [9]



Obrázek 10 Mikroskopická struktura kompozitu se skelnými vlákny

a) bez vazebných prostředků b) s vazebnými prostředky [9]

7 ZPŮSOBY PORUŠENÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

Při statickém nebo dynamickém zatížení může materiál absorbovat energii dvěma způsoby, a to přetvořením materiálu nebo tvořením nových povrchů. Přetvoření materiálu nastává první a při dodání dostatečně velké energie může vzniknout trhlina, která se může dále rozvíjet. U křehkých materiálů dochází k malému přetvoření a z toho vyplývá, že absorbovaná energie je nízká. U houževnatých materiálů dochází k velkému plastickému přetvoření a tím je absorbována velká energie. V kompozitech může být větší houževnatosti dosaženo nahrazením složky s nižší absorpcí energie za složku s větší absorpcí. Příkladem můžou být hybridní kompozity, kdy je část uhlíkových vláken nahrazují skelná vlákna [1, 9].

Lze předpokládat, že porušení vláknových kompozitů vzniká stejně jako u jiných materiálů z malých vrozených defektů. Tyto defekty mohou být zlomená vlákna, chyby v matici nebo uvolněný smyk fází. Při procesu porušování přispívají k absorbované energii různé mechanismy, které však u kombinace materiálu a výztuží nebudou stejné [1, 9].

Možné druhy porušení:

• Přetrhávání vláken

Při rozvíjení trhliny ve kolmém směru na vlákna, dochází k jejich přetržení. Vlákna se přerušují po dosažení meze přetvoření. Křehká vlákna mají nízké mezní přetvoření a tím i nízkou schopnost absorpce energie. I když jsou vlákna zárukou vysoké pevnosti kompozitu, na samotné porušení vláken připadá jen malá část absorbované energie [1, 35].

• Přetvoření a trhání matrice

Pro úplné porušení kompozitu se musí porušit i materiál matrice, který obklopuje vlákna. Celková energie absorbovaná trhlínkováním matrice je rovna násobku povrchové energie a nové lomové plochy. Pokud se trhlina šíří pouze v jednu směru, nově vzniklá plocha je malá a odpovídající lomová energie je nízká. Větší trhlínové plochy mohou vzniknout při rozvětvení trhliny kolmo k základnímu směru porušování. Tento mechanismus může zvýšit lomovou energii, a tedy účinně zvýšit i houževnatost kompozitu [1, 18].

• Oddělování vláken

Při porušování materiálu mohou být vlákna oddělena od matrice trhlinami souběžnými s vlákny. Při tomto procesu dochází k přerušování chemických nebo sekundárních vazeb mezi vlákny a matricí. K tomuto efektu dochází za předpokladu, že jsou vlákna pevná a adheze je slabá. Pokud je oddělování rozsáhlé, dochází ke zvýšení lomové energie. Při snížení adhezní pevnosti se zvýší rázová energie a umožní rozsáhlé oddělování a delaminaci [1].

• Vytahování vláken

K vytažení vláken dochází, když jsou křehká nebo nespojitá vlákna vložena do houževnaté matrice. Vlákna se přetrhnou v místě nejslabšího příčného řezu. Koncentrace napětí vyvolaná přetržením vlákna v matrici se redukuje kluzem matrice. Porušení vláken může pokračovat vytahováním zlomených vláken za doprovodu přetváření matrice [8].

• Delaminace

Delaminační trhliny jsou příčinou absorbování velkého množství lomové energie a často vznikají v laminátech při zkoušení ohybových vlastností nebo v rázových testech metodou Charpy a Izod [1].

8 MECHANIKA VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

Hlavním úkolem mechaniky kompozitních materiálů je stanovení mechanických charakteristik (deformačních a pevnostních) na základě známých mechanických složek, při definované struktuře a objemovém složení kompozitu [10, 8].

Vhodnou kombinací složek s využitím příslušných výrobních technologií je možné vytvořit nehomogenní anizotropní materiálovou strukturu, která odpovídá deformačním a pevnostním požadavkům na příslušné těleso. Ve srovnání s běžnými kovovými materiály je možné zvýšit pevnost, tuhost, lomovou houževnatost, odolnost proti korozi, upravit tepelnou a elektrickou vodivost nebo redukovat hmotnost. Nevýhodou je většinou komplikovanější výrobní technologie, vyšší cena, menší odolnost vůči vysokým teplotám, přítomnost zbytkových napětí v souladu s výrobní technologií atd [12, 27].

8.1 Mechanické vlastnosti vláken

Materiálové pevnostní charakteristiky jsou determinovány přítomností nadkritických poruch, kde vzniká a odkud se šíří trhлина, vedoucí finálně k lomu. Je zřejmé, že absolutní počet těchto poruch závisí na objemu materiálu, tedy jeho rozměrech [31, 27].

Vlákna se technologicky vyrábějí ve svazcích a mají náhodné rozdělení poruch, které způsobují lokální koncentraci napětí a mají i poněkud odlišné rozměry. Některá vlákna ve svazku prasknou již při začátku zatěžování. Z těchto důvodů se uvažuje, že je průměrná pevnost vláken ve svazku menší než jednoho taženého vlákna [27].

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [2]

	E_t	σ_{Pt}	ρ	σ_{Pt} / ρ	$\varepsilon_{f,krit}$
	<i>GPa</i>	<i>MPa</i>	10^3 kgm^{-3}	<i>MPa / kgm⁻³</i>	%
Sklo - E	72,4	3500	2,54	1,38	2,5
Sklo - S	85,5	4600	2,48	1,85	2,5
Grafit - E	390	2100	1,9	1,1	0,7
Grafit - S	240	2500	1,9	1,3	0,7
Bor	385	2800	2,63	1,1	0,8
W	414	4200	19,3	0,22	
Aramid Kevlar 49	130	2800	1,5	1,87	2,5
Azbest	160	3100	2,56	1,21	1,9
SiC	250	2200	2,6	0,85	0,9
Polyethylen PE Spektra	172	3000	0,97	3,09	1,7
Ocel	210	340-2500	7,8	0,0440-0,321	

Kde E_t je modul pružnosti v tahu, σ_{Pt} je pevnost v tahu, ρ je hustota, σ_{Pt} / ρ je měrná pevnost a, $\varepsilon_{f,krit}$ je tažnost.

8.2 Mechanické vlastnosti matricových materiálů

Nejčastěji se používají organické polymerní matrice. Zaměříme se na jejich dvě základní charakteristické skupiny – termosety a termoplasty. Základní vlastností termosetů je skutečnost, že zůstávají v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jejich odolnost vůči creepu a vyšším teplotám. Při procesu vytvrzování dochází ke vzniku tuhé prostorové polymerní sítě. U konstrukčních aplikací vláknových kompozitů tento typ matric převládá [28].

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti vybraných matricových materiálů [2]

	ρ	E_t	σ_{Pt}	$\varepsilon_{m,krit}$
	10^3 kgm^{-3}	<i>GPa</i>	<i>MPa</i>	%
Epoxidová pryskyřice	1,1-1,4	2,1-6,0	35-90	1-10
Polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50-60	1-3
Polyimidy (až do teploty 350 °C)	1,2-1,9	3,0-3,1	80-190	2-40

ÚKOLEM MATRICE JE:

- zajistit přenos namáhání na vlákna
- převedení namáhání z vlákna na vlákno
- zajistit geometrickou polohu vláken a tvarové stability
- chránit vlákna před nežádoucími vlivy okolí
- zajistit adhezi na rozhraní vlákno/matrice

Dobrá adheze mezi vláknem a matricí zaručuje výrazně lepší mechanické a tepelné vlastnosti výrobků [28].

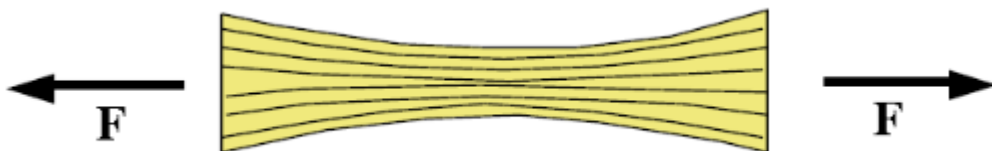
8.3 Druhy namáhání

Pro mechanické zatěžování kompozitů lze vycházet ze čtyř základních druhů namáhání.

Každý kompozit tedy musí být odolný na tah, tlak, smyk a ohyb [10].

8.3.1 Tah

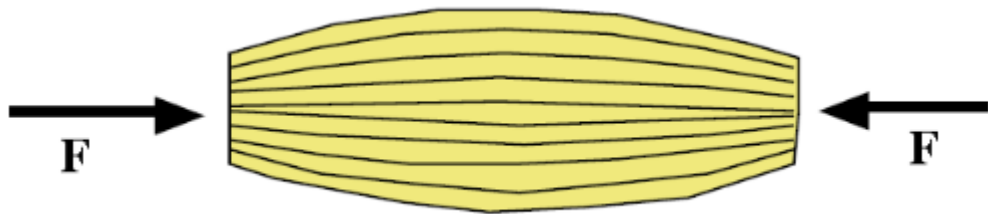
Reakce kompozitu na tahové zatížení je velmi závislá na tuhosti a síle vyztužujících vláken než na samotné matrici [10].



Obrázek 11 Aplikace tahového napětí na kompozitní materiál [8]

8.3.2 Tlak

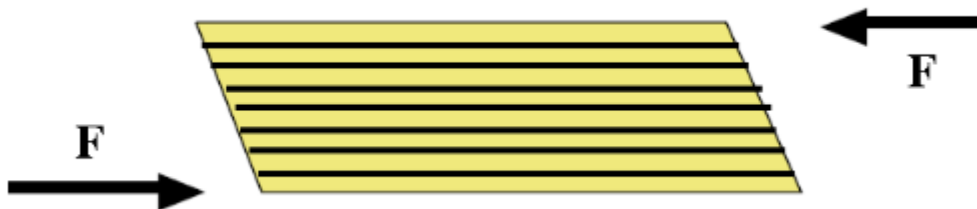
V případě tlakového namáhání jsou adhezivní a vyztužující vlastnosti pryskyřice zásadní. Pryskyřice udržuje vlákna pohromadě a zabraňuje zborcení [10].



Obrázek 12 Aplikace tlakového napětí na kompozitní materiál [8]

8.3.3 Smyk

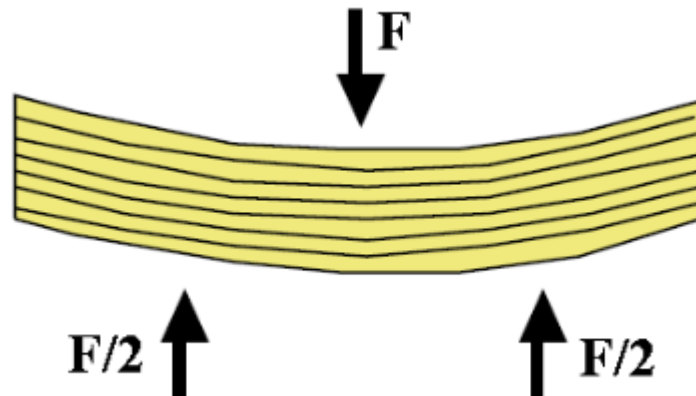
Při tomto druhu namáhání mají vrstvy tendenci klouzat jedna po druhé. Pryskyřice zaujímá hlavní funkci, a sice přenáší napětí napříč celým kompozitem. Pokud má kompozit dobře odolávat smykovému napětí, musí jednotlivé elementy pryskyřice vykazovat dobré mechanické vlastnosti, ale také vysokou adhezi k vyztužujícím vláknům [10].



Obrázek 13 Aplikace smykového napětí na kompozitní materiál [8]

8.3.4 Ohyb

Ohybové namáhání je kombinace tahu, tlaku a smyku. Při zatížení kompozitu třibodovým ohybem (viz. obrázek), je horní část tělesa namáhána tlakem, spodní část je namáhána tahem a smykové napětí působí v centrální části tělesa [10].



Obrázek 14 Aplikace ohybového napětí na kompozitní materiál [8]

8.4 Pevnost

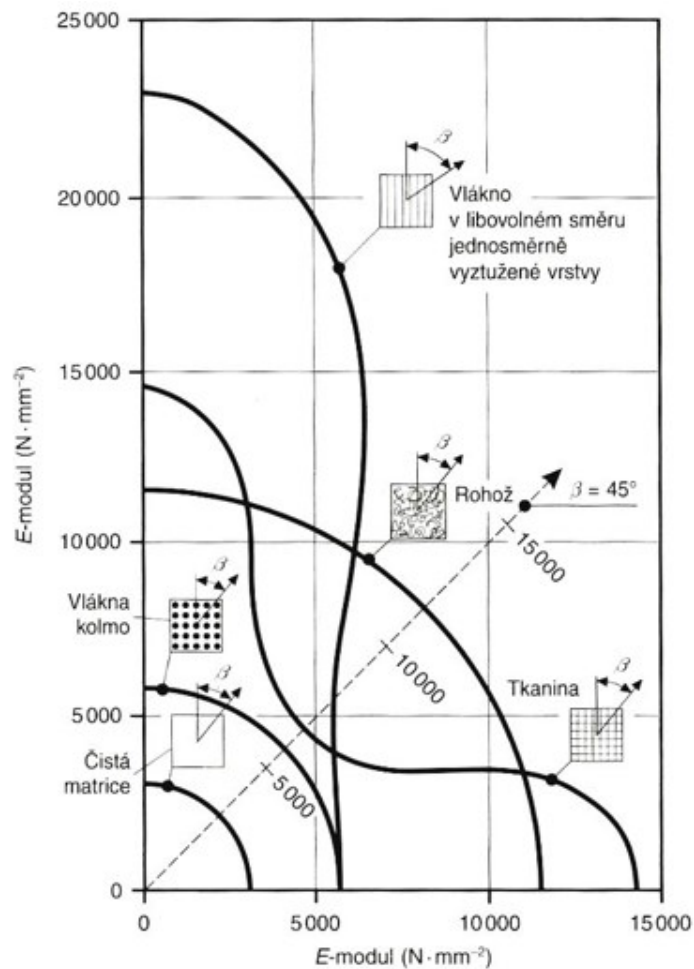
Ztráta pevnosti jednosměrně vyztuženého kompozitu v tlaku oproti pevnosti v tahu je způsobena vychýlením vláken, tedy ztrátou stability. Na rozdíl od kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny vznikají u skelných kompozitů velká přetvoření. Pevnost ve smyku matrice je 50-60 % její pevnosti v tahu a ta je menší než pevnost v tlaku [32, 10].

8.5 Tuhost (Modul pružnosti)

Uložení vláken do matrice vždy zvyšuje její tuhost bez ohledu na orientaci vláken.

V případě modulu pružnosti, který se určuje při nízkých úrovních namáhání, se vlivy koncentrací napětí mezi vlákny a matricí neprojevují (směřují k tvorbě mikrotrhlin).

Při namáhání tahem a tlakem je modul největší ve směru orientace vlákna, zatímco u smykového namáhání je nejmenší [31, 10].



Obrázek 15 Modul pružnosti různých druhů vyztužení epoxidové pryskyřice skleněnými vlákny jako funkce úhlu zatížení β (obsah vláken asi 50 objem. %) [29]

9 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

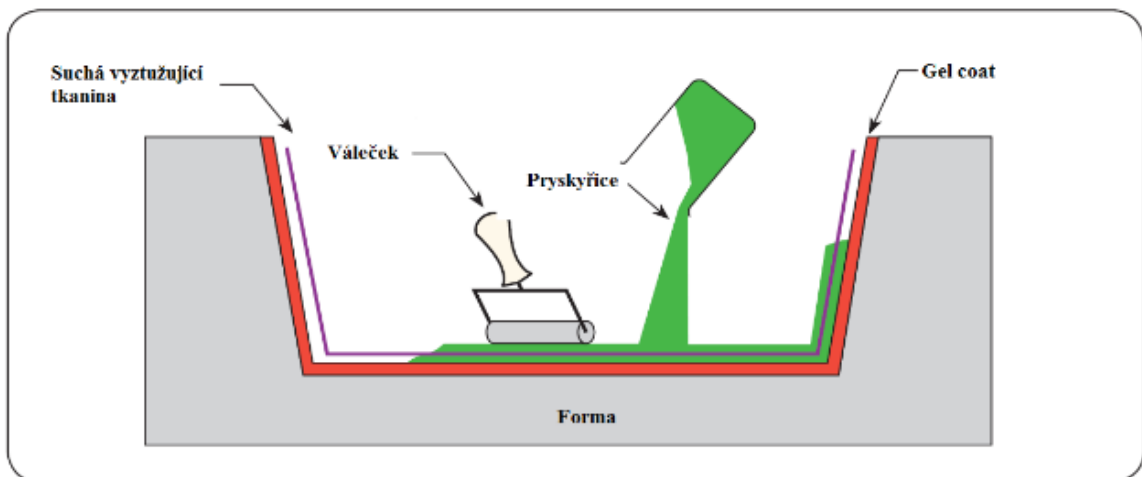
Výrobní proces kompozitních materiálů je v porovnání s jinými konstrukčními materiály značně složitější a z technologického hlediska náročnější. Při jejich výrobě je důležité zajistit zejména tyto vlastnosti:

- Rovnoměrné uložení vláken ve vrstvě
- Uložení s libovolnou orientací vláken
- Dokonalé spojení matrice s vlákny
- Možnost objemové změny vláken
- Možnost dodatečného tepelného zpracování kompozitu
- Jednoduchá a hospodárná výroba

V moderní době existuje široká škála technologií pro výrobu vláknových kompozitů, které se neustále zdokonalují. Nejrozšířenější technikou je však metoda ručního laminování, která je nenáročná, efektivní a levná [10].

9.1 Ruční laminování

Ruční laminování se někdy nazývá i kontaktní lisování a jedná se o proces, ve kterém je nanášení pryskyřice i výztuže prováděno ručně na vhodný povrch pozitivní nebo negativní formy. Podle toho, na který povrch jsou komponenty nanášeny, je dosaženo kvality povrchu vytvrzeného kompozitního dílce. Jedná se o jednu z omezujících zvláštností tohoto výrobního procesu a sice, pouze jedna strana výrobku má kvalitní povrch. Po nanesení výztuže a provlččení pryskyřicí je připravený ruční kompozit ponechán k vytvrzení [14, 10].



Obrázek 16 Technologie ručního laminování [3]

Výhodami ručního laminování je především jednoduchost technologie, dále minimální náklady na nástroje a prakticky neomezená variabilita tvarů a velikostí výrobků. Nevýhodou je nereprodukovatelnost odpadu, který lze jen těžko znovu zpracovat, relativně velký objem odpadu, náročnost na lidskou práci, pouze jeden kvalitní povrch výrobku, malá produktivita výroby a kvalita výrobku silně závislá na zkušenostech a schopnostech pracovníka [14, 25].

Výztuže: Jsou na bázi skleněných, uhlíkových, aramidových či jiných syntetických nebo přírodních vláken v různých formách, nejčastěji jako tkaniny různé gramáže, stylu tkaní a orientace nebo rohože (konstrukční i povrchové) a různé netkané či tkané sendvičové materiály [10].

Prskyřice: Nejčastěji polyesterové nebo epoxidové, typ prskyřice, iniciátoru nebo tužidla je třeba zvolit dle potřebné doby zpracování při výrobě, dále dle požadavků na pevnostní charakteristiky, teplotní a chemickou odolnost nebo speciální požadavky (snížená hořlavost, malé smrštění pro stavbu forem apod.) vždy s ohledem na konečné použití výrobku [25].

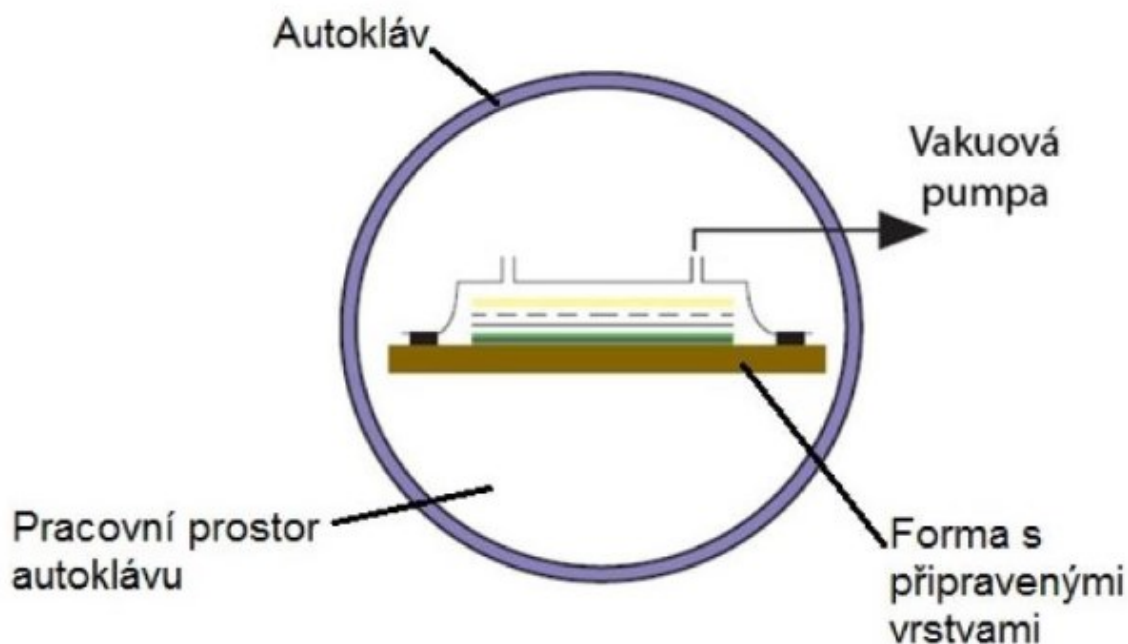
9.2 Vytvrzování v autoklávu

Jedná se o vytvrzení kompozitu pomocí tepla a tlaku v uzavřené nádobě (autoklávu) s přesně řízenými parametry vytvrzování. Výhodami je další zvýšení obsahu výztuží, mohou být použita jádra na odlehčení kompozitů, ale také lze v jednom kroku zabudovat další součásti, najednou může být vytvrzeno mnoho částí v jednom autoklávu. Nevýhodou je vysoká cena autoklávů, metoda je velmi pracná a náročná, velikost vyráběných dílů je podmíněna velikostí autoklávu. [33, 25]

Používané materiály:

Prepregy na bázi skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken (pro letecké a kosmické aplikace jsou užívána také vlákna borová nebo siliciumkarbidová) nejčastěji s epoxidovou matricí, vytvrzující při 120-200 °C [10].

Vytvrzování v autoklávu se používá pro nejnáročnější velkorozměrové struktury pro kosmický a letecký průmysl, závodní automobily a velkorozměrové obkladové panely dopravních prostředků se střední až vysokou sériovostí [10].

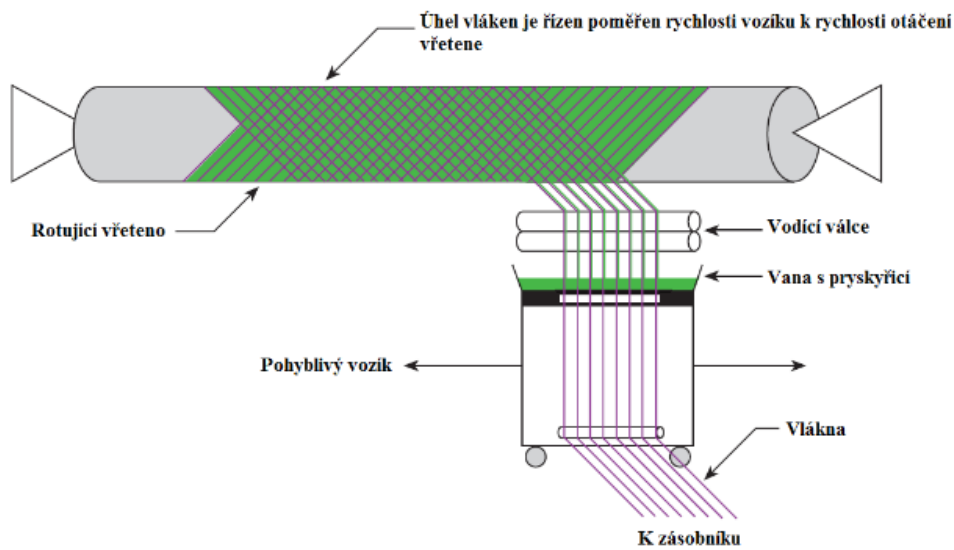


Obrázek 17 Technologie vytvrzování v autoklávu [3]

9.3 Navíjení

Tato technologie je založena na kontinuálním navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou, smrštitelnou formu. Vlákná jsou navíjena buď již navlhčena pryskyřicí, nebo se provlhčují až po navinutí. Požadovaných vlastností kompozitu se dosahuje přesným uspořádáním a orientací pramenců vláken a výztuží. Vytvrzení se provádí na jádře, které je potom z vytvrzeného výrobku vyňato [10].

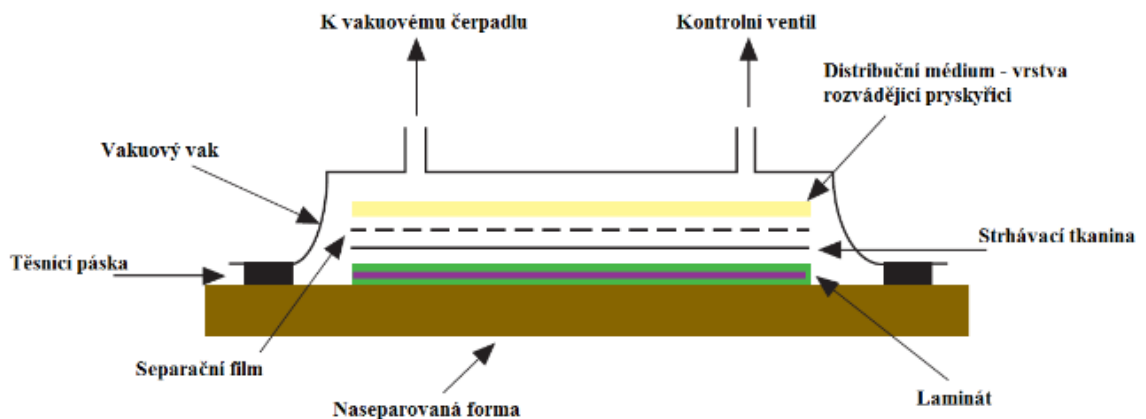
Výhodou je použití nejlevnější formy výztuže – rovingu. Proces má poměrně velmi dobrou produktivitu a může být vysoce automatizovaný. Hodí se především pro výrobu potrubí, kolen, zásobníků paliv, velkých součástí s konkávním povrchem. Nevýhodami je vysoká cena navíjecích strojů, nesnadné odstraňování vnitřních forem a poměrně nízká produktivita u výroby tlakových nádraží, kde je nutno používat některé speciální postupy. [25]



Obrázek 18 Technologie navíjení [2]

9.4 Metoda vakuového vaku

Tato metoda je pouze zlepšením metody ručního laminování v poslední fázi vytvrzování. Tenký film, který nepropouští vzduch je položen na volný povrch ručně kladeného kompozitu, forma je zavakuována a tlakem filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin. Výhodami tohoto výrobního postupu je možnost připravit materiály s minimálním obsahem vzduchových bublin, umožňuje dosáhnout vyššího obsahu výztuží, všechny výhody ručního kladení jsou zachovány, je vynikající pro sendvičové struktury. Nevýhody tvoří velký obsah odpadu a dostatečná kvalifikace pracovníka [25]



Obrázek 19 Metoda vakuového vaku [2]

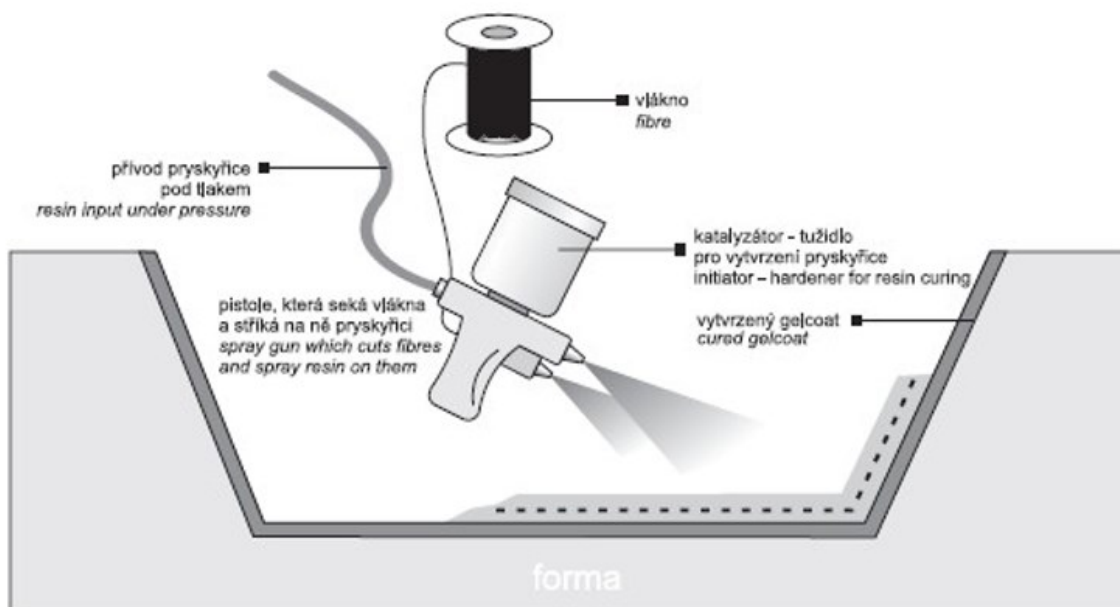
9.5 Stříkání

Touto speciální technologií se pneumaticky na formu aplikuje současně sekaný roving a pryskyřice. Samotné nanášení se realizuje většinou ručně, lze je však automatizovat a ovládat počítačem [10].

Formy jsou jednoduché, prakticky srovnatelné jako pro metodu ručního laminování.

Jako první se aplikuje gelcoatová vrstva a to ručně nebo nástřikem. Stříkání se provádí v několika vrstvách v závislosti na požadované tloušťce vyráběného dílu. Každá vrstva nanesené směsi se ztlučuje pomocnými válečky různých velikostí a tvarů. Tímto procesem se vrstvy zhutní a zároveň se vytlačí vzduchové bubliny [10].

Stříkání patří k druhům tzv. otevřených technologií, proto je nutné jej provádět v odvětrávaném prostoru, např. v stříkacích boxech a to hlavně z důvodu, že pro tuto technologii se téměř výhradně používají polyesterové pryskyřice, které obsahují škodlivý styren [10].



Obrázek 20 Technologie stříkání [2]

Používané materiály:

Výztuže:

Převážně skleněné rovingy, výjimečně i jiné kontinuální vlákna [10].

Pryskyřice:

Většina polyesterových pryskyřic na bázi izoftalové, oroftalové nebo tereftalátové [10].

Technologie stříkání je vhodná pro výrobu i velkorozměrových nenáročných součástí. Lze ji použít i pro nanášení laminátové směsi na rub polymetylmakrylátových sanitárních výrobků (van, umyvadel, den sprchových koutů) za účelem zvýšení jejich pevnosti a tvarové stálosti [10].

Stříkání se aplikuje primárně pro sériovou výrobu. Nevýhodou je větší množství odpadu a relativně vysoké vstupní náklady na zařízení a odsávací jednotky spojené se systémem likvidace styrenových par z odtahu, dále vyšší obsah pryskyřice, což má negativní dopad mechanické vlastnosti [10].

9.6 Lisování za studena

Provádí se působením nízkého tlaku 0.3 – 10 kg/cm² za běžných teplot. Formy nejsou temperované, mohou tedy být ekonomicky nenáročné. Běžné materiály forem jsou lamináty, plechy nebo hladká lamina). Používají se formy dvoudílné, výrobek má tedy oboustranně hladký povrch. Tlak je získáván pomocí šroubových svěrek, nebo hydraulických válců [10].

Používané materiály:

Výztuže:

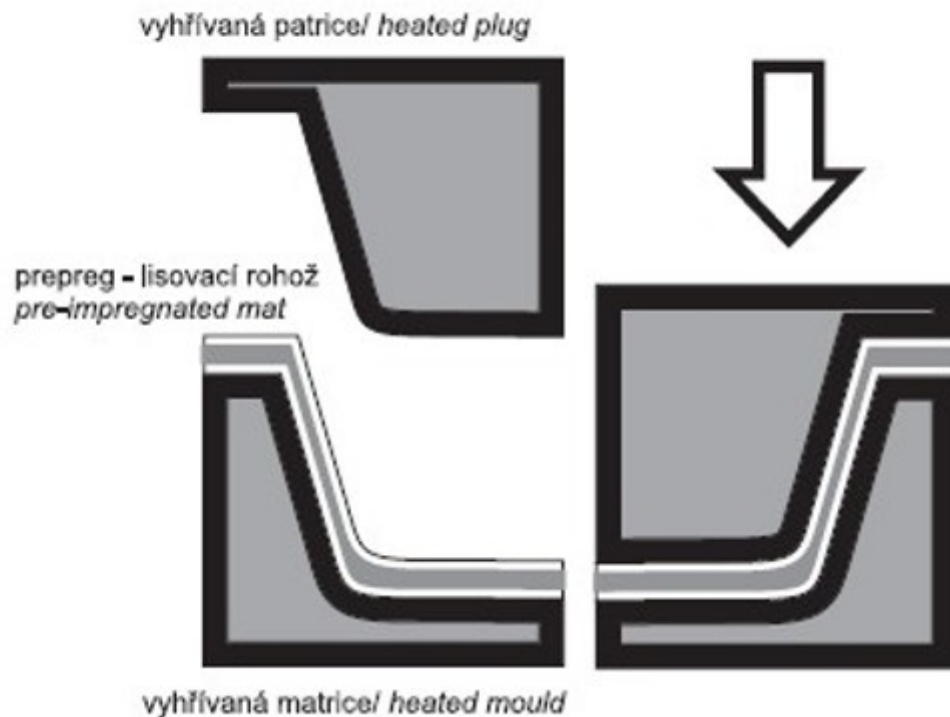
Většinou se jedná o tkaniny na bázi skleněných, uhlíkových a jiných vláken o různé gramáži, v různém stylu tkaní a orientace [10].

Pryskyřice:

Pryskyřičné systémy na bázi epoxidu a polyesteru vytvrzující za běžných teplot [10].

9.7 Lisování pomocí tepla a tlaku

Provádí se za působení vyšších teplot a tlaků ve dvou a vícedílných kovových formách, které musí mít kvalitně opracované pracovní plochy. Formy se temperují většinou topnými tělesy nebo mediem a jsou upevněny v hydraulických lisech schopných produkovat tlaky 10-300 kg/cm². Východím materiálem jsou buď prepregy- tzv. lisovací rohože (SMC – sheet moulding compounds), lisovací těsta (DMC- dough moulding compounds) nebo lisovací směsi -premixy (BMC – bulk moulding compounds). Za zvýšené teploty a tlaku jsou prepregové přířezy schopny ve formě dalšího toku, materiál zcela zaplní dutinu formy a dalším působením tepla nastane kompletní vytvrzení [10].

Lisování za tepla SMC/ Hot press moulding SMC

Obrázek 21 Technologie lisování za tepla a tlaku [2]

Lisování za tepla a tlaku je jednou z nejproduktivnějších technologií pro velké výrobní série (2-5 tis. kusů) malých a středně velkých součástí. Výhodou jsou krátké lisovací cykly v řádech několika minut, vysoká reprodukovatelnost kvality, rozměrové stability a možnost automatizace výrobního procesu [10].

Nevýhodou jsou vysoké vstupní náklady na technologie a příslušné formy [10].

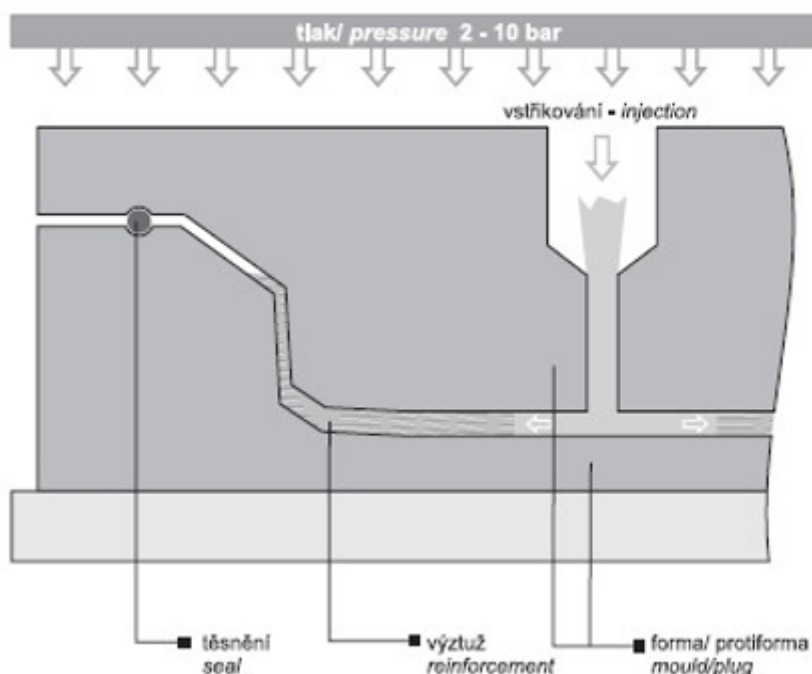
9.8 Vysokotlaké vstřikování (RTM-resin transfer moulding)

Tato metoda využívá konstrukčně robustních forem z kovových nebo polymerbetonových materiálů, aby snesly velké tlakové zatížení [10].

Do formy, opatřené gelcoatem, se vyskládá suchá výztuž dle konstrukčního návrhu, při velkosériové výrobě se vkládají tzv. předlisky z výztužného materiálu. Vyztužující materiál, ať už na bázi skleněných nebo jiných vláken, musí mít strukturu umožňující snadný tok pryskyřičného systému, aby se dosáhlo úplného prosycení v krátkém čase. Forma se poté uzavře vrchním dílem podobně tuhé konstrukce a zajistí rychloupínacím systémem. Vstřikovacím otvorem se pomocí injektážní pistole přivádí pojivo z vysokotlaké pumpy se spřaženým regulovatelným směšováním iniciátoru. Pojivo se vstřikuje do té doby, dokud nezačnou vznikat přetoky na kontrolních otvorech, to je signál, že výztuž je kvalitně prosycena v celém objemu součásti [10].

Pojivový systém je volen s ohledem na vytvrzovací reakci, která by měla proběhnout s pomocí exotermu v rozmezí 10-20 minut [10].

Vysokotlaké RTM/ high pressure RTM



Obrázek 22 Technologie RTM [2]

Vysokotlaké RTM je vzhledem ke kratším výrobním cyklům a dobré kvalitě vhodná technologie pro větší sériovost výrobků – několik stovek až tisíců kusů [10].

Je třeba brát v potaz vysokou vstupní investicí na vstřikovací zařízení a náklady na ekonomicky náročné formy. Náklady na protilehlou stranu formy lze eliminovat použitím tzv. distančních voskových folií o různé tloušťce kompatibilní s tloušťkou výrobku [10].

Výztuže:

Nejrozšířenější jsou rohože z nekonečných vláken nebo prošíváné rohože a speciální komplex skleněná rohož + vnitřní řídká rohož ze syntetických vláken typu Rovicore nebo Combiflow, tedy povrchové rohože s nízkou hmotností [10].

Pojiva:

Používají se většinou polyesterové pryskyřice s aplikovaným urychlovačem, ve většině případů ve směsi s levnějšími plnivy (uhličitan vápenatý, aluminiumtrihydrát) pro snížení nákladů a úpravu vlastností, např. snížení hořlavosti, speciální typy tzv. class A se sníženým smrštěním pro automobilové komponenty k přímé aplikaci bez dalších povrchových úprav [10].

9.9 Vakuo-injekční technologie (VARTM-vacuum assisted resin transfer moulding, RTM light)

Jedná se o modifikaci klasické technologie RTM, kdy prosycení výztuže napomáhá vakuum.

Používají se dvě základních uspořádání:

- vstřikování do středu formy, vakuum je aplikováno po obvodu formy
- přívod pojivy do obvodového kanálku, vakuum je aplikováno ve středu formy

Výhodou této technologie je díky nižším tlakům (0.4-1 bar) možnost konstruovat formy méně robustní, což umožňuje výrobu i větších dílců [10].

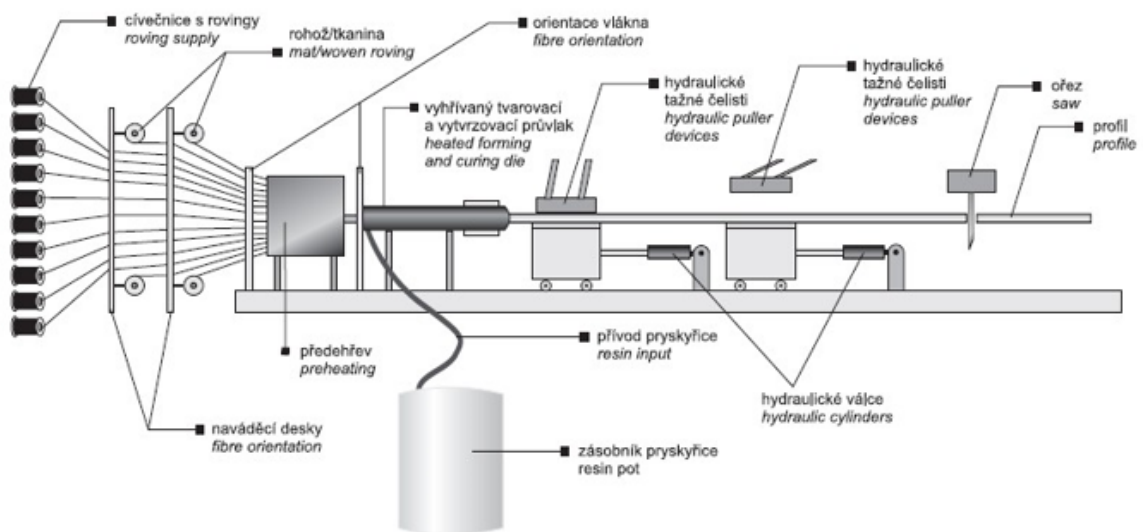
9.10 Tažení (pultruze)

Touto metodou lze vyrábět velmi efektivně kontinuálním způsobem různé plné, duté i tvarové profily s vysokým obsahem výztuže (až do 80%). Výztuž tvoří nejčastěji skleněné, uhlíkové nebo i jiné druhy pramence, případně v kombinaci se stuhami z tkanin a rohoží za účelem příčného vyztužení, jenž prochází lázní s pryskyřicí a po prosycení a odstranění přebytečné pryskyřice je vtahována do tvarovacích a vytvrzovacích forem, jejichž dutina je obrazem vnějšího tvaru vyráběných profilů.

Modifikací této technologie je tlakové prosycování suché výztuže až v počáteční sekci formy [10].

Ve formě dochází buď působením sdíleného tepla (formy jsou vyhřívány elektricky nebo topným médiem) nebo vznikem tepla účinkem vysokofrekvenčního pole k vytvrzení. Vytvrzený kompozitní profil je odtahován hydraulickými čelistmi nebo pásovými elementy a krácen na požadovaný rozměr [10].

Variantou prosté pultruze je tzv. pulforming, kdy se během semikontinuálního procesu táhne prosycená výztuž, které je v následujícím kroku v dvoudílné vyhřívané formě udělen konečný tvar, např. listové eliptické pero-pružina s proměnným průřezem po délce [10].



Obrázek 23 Schéma technologie tažení [2]

Použité materiály:

Výztuže:

Běžné skleněné rovingy, méně často uhlíkové pramence, tkané stuhy, pásy z různých vláken nebo rohože s těžko rozpustným pojivem,[10].

Pojiva:

Nízkoviskozní polyesterové, vinylesterové nebo epoxidové pryskyřičné systémy vytvrzující rychle za zvýšených teplot (80-160 °C). Pojiva běžně obsahují separátory, aditiva pro lepší jakost povrchu a snadné probarvení, pigmenty a plniva např. pro snížení hořlavosti [10].

Technologie je vhodná pro kontinuální výrobu profilů od velmi tenkých a jednoduchých (1 mm pásy pro vyztužení hokejek a lyží) až po velmi složité a rozměrné (šíře a výška několik desítek cm, tloušťka stěny až 15 mm) [10].

10 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část popisuje obecnou problematiku kompozitních materiálů. Jejich složení, druhy používaných materiálů, vlastnosti a oblasti použití v průmyslových aplikacích. S ohledem na jejich druhové zastoupení byly pro účely diplomové práce zvoleny kompozity vláknové. Další kapitoly zachycují druhy používaných vláken, všeobecné zastoupení vláknových výztuží a další materiály potřebné na výrobu vláknových kompozitů. Dále je proveden rozbor možných vad v mikrostruktuře, jejich příčin vzniku a nejběžnější druhy mechanického porušení. V této návaznosti je popsána i mechanika kompozitních materiálů se zaměřením na základní druhy namáhání. Závěrečná část teoretické části pojednává o výrobních technologiích, kde mimo běžně používané druhy jsou popsány i technologie speciální.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

11 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo zjistit, zda má vliv výrobní technologie na mechanické vlastnosti a mikrostrukturu u vybraných vláknových kompozitů. K porovnání byla zvolena technologie ručního laminování a technologie ručního laminování s pomocí vakuové folie.

Pro vyhodnocení bylo použito několik druhů metod:

- zkouška namáhání tahem
- zkouška namáhání ohybem
- vizuální porovnání a zhodnocení mikrostruktury

12 ZPRACOVÁNÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI

V prostorách laboratoře UVI na FT UTB ve Zlíně byly vyrobeny dvě desky ze skelné tkaniny a pryskyřice. Každá z nich však jinou zpracovatelskou technologií. Po vytvrzení byly desky transportovány do externí společnosti za účelem zhotovení zkušebních tělísek, které měly jasně definovanou geometrii. Na zhotovených tělískách byly realizovány zkoušky mechanického namáhání na tah a ohyb. Pro porovnání vnitřní struktury proběhla vizuální kontrola pod mikroskopem. Všechny shromážděné údaje byly podkladem pro vyhodnocení experimentu. Cílem bylo porovnat jednotlivá tělíska a určit, která zvolená technologie zaručuje lepší mechanické vlastnosti pro výrobu kompozitu a analyzovat vznik možných vad v mikrostruktuře.



Obrázek 24 Vyrobené kompozitní desky

12.1 Použitá zkušební tělíska

Pro vyhodnocení byly použity dva druhy tělísek z hlediska výrobní technologie. Rozměrově byly upraveny dle požadavků normy pro každou zkušební metodu.



Obrázek 25 Ukázka zkušebního tělíska

12.1.1 Skelná výztuž

Všechna zkušební tělíska byla vyrobena ze skelné tkaniny v plátnové vazbě od společnosti Havel Composites. Jedná se o tkaninu ze skelné příze typu E skla pod obchodním značením Aeroglass 280 s parametry 297g/m^2 . Příze má úpravu pro většinu běžně používaných pryskyřic. Vzhledem k tomu, že vlákna neobsahují vosk, jsou vhodné zejména pro epoxidové pryskyřice. Tato konstrukční tkanina vyniká snadným prosvětlováním a dobrou tvarovatelností.

Detailnější popis je obsažen v materiálovém listu viz. příloha.



Obrázek 26 Skelná výztuž

12.1.2 Epoxidová pryskyřice a tužidlo

Pro experiment byla použita epoxidová pryskyřice a tužidlo od společnosti Havel Composites. Pod značením LH 385 se jedná o pryskyřici, která se vyznačuje nízkou viskozitou a zaručuje výborné aplikační vlastnosti. Spolu s tužidlem typu 285 MGS, byla namíchána dle předpisu v poměru 100:40/váhově.

Detailnější popis je obsažen v materiálovém listu viz. příloha.



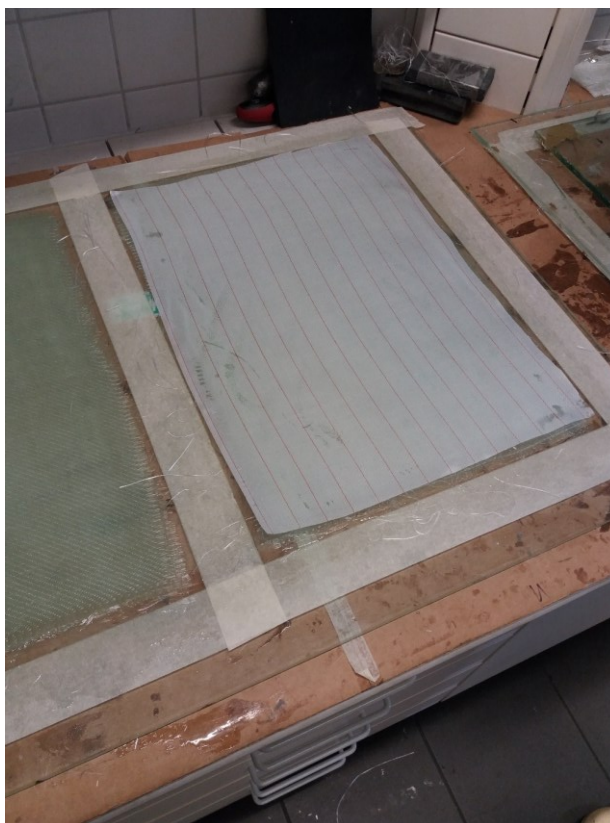
Obrázek 27 Použitá pryskyřice a tužidlo

12.2 Výrobní postup desek

Výroba desek byla provedena metodou ručního laminování. Do navoskovaných forem se postupně vkládalo celkově 6 jednotlivých vrstev skelné tkaniny s ohledem na jejich bezpečné prosycení. Každá vrstva byla stlačena ručním válečkem, což zajistilo i vytlačení přebytečné pryskyřice. Pro vakuové stlačení byla použita ještě vrstva tzv. odtrhové tkaniny a vrstva odsávací tkaniny.



Obrázek 28 Nanášecí a tlačný váleček



Obrázek 29 Zhotovené desky

V tomto stavu byla první deska již vyrobená, u druhé desky proběhla příprava na vakuový proces. Po obvodu formy byla aplikována vakuová fólie za účelem odsátí vzduchu a nežádoucího množství pryskyřice.



Obrázek 30 Zhotovená deska po aplikaci vakua

Po vytvrzení byly desky odformovány a určené k výrobě zkušebních tělísek.

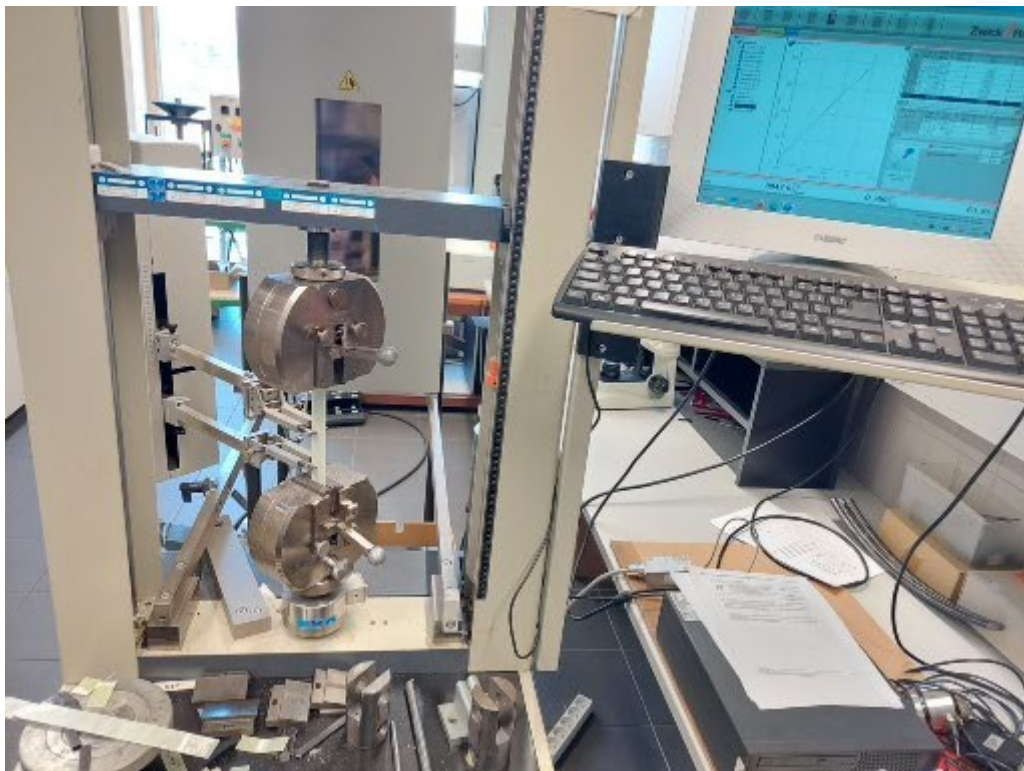
12.3 Mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky byly provedeny v laboratoři UVI na FT UTB.

Zkouška tahem a ohybem byly provedeny na přístroji ZWICK ROELL 145 665. Přístroj je propojen počítačem, který je opatřen zkušebním softwarem testXpert.

Technické parametry přístroje ZWICK ROELL 145 665

- maximální zkušební síla 100 kN
- výška přístroje 2012 mm
- šířka přístroje 630 mm
- strojová výška 1284 mm
- šířka pracovní části 420 mm
- celková hmotnost 150 kg



Obrázek 31 Přístroj Zwick Roell

12.3.1 Zkouška tahem

Provedená zkouška se opírala o normu ČSN EN ISO 527-4. Zkušební vzorky byly testovány v rovnoběžném směru se směrem orientace vláken. Pro porovnání bylo měřeno 10 vzorků z každé série. Z měření byly posuzovány tyto parametry:

- napětí v tahu σ_t [MPa]
- modul pružnosti v tahu E_t [MPa]
- vykonaná práce W [N.mm]



Obrázek 32 Zatěžované zkušební tělísko tahem

Tabulka 3 Přehled naměřených hodnot pro tah

	σ_t	E_t	w
n=10+10	MPa	MPa	N.mm
1	267,8	14519,2	10530,13
2	273,7	12760	9599,01
3	277,9	15335,1	9762,94
4	239,1	16440,7	6520,32
5	300,3	14586,5	10879,89
6	273,9	11731,9	8789,67
7	305,4	16492,2	11079,99
8	302,8	13934	12012,55
9	303,3	14447,2	11017,86
10	262,7	12905,4	8407,05
1	276,7	12938,5	9156,4
2	214,6	12569,6	5391,36
3	260,6	15426,2	7729,94
4	248,1	13507,6	7025,36
5	252,3	12814,3	7670,98
6	234	13892,4	6611,74
7	257,5	11675,7	8085,22
8	231,6	12449,7	6406,77
9	261,4	13436,3	8692,06
10	275,5	13913,2	9830,35

Tabulka 4 Sklolaminát bez vakua

sklolaminát bez vakua	σ_t	E_t	w
n = 10	MPa	MPa	N.mm
\bar{x}	280,7	14315,2	9859,94
s_x	21,9	1551,2	1613,81
{ny}	7,8	10,84	16,37

Tabulka 5 Sklolaminát s vakuem

sklolaminát s vakuem	σ_t	E_t	W
$n = 10$	MPa	MPa	N.mm
\bar{x}	251,2	13262,4	7660,02
S_x	19,7	1030,4	1350,7
{ny}	7,85	7,77	17,63

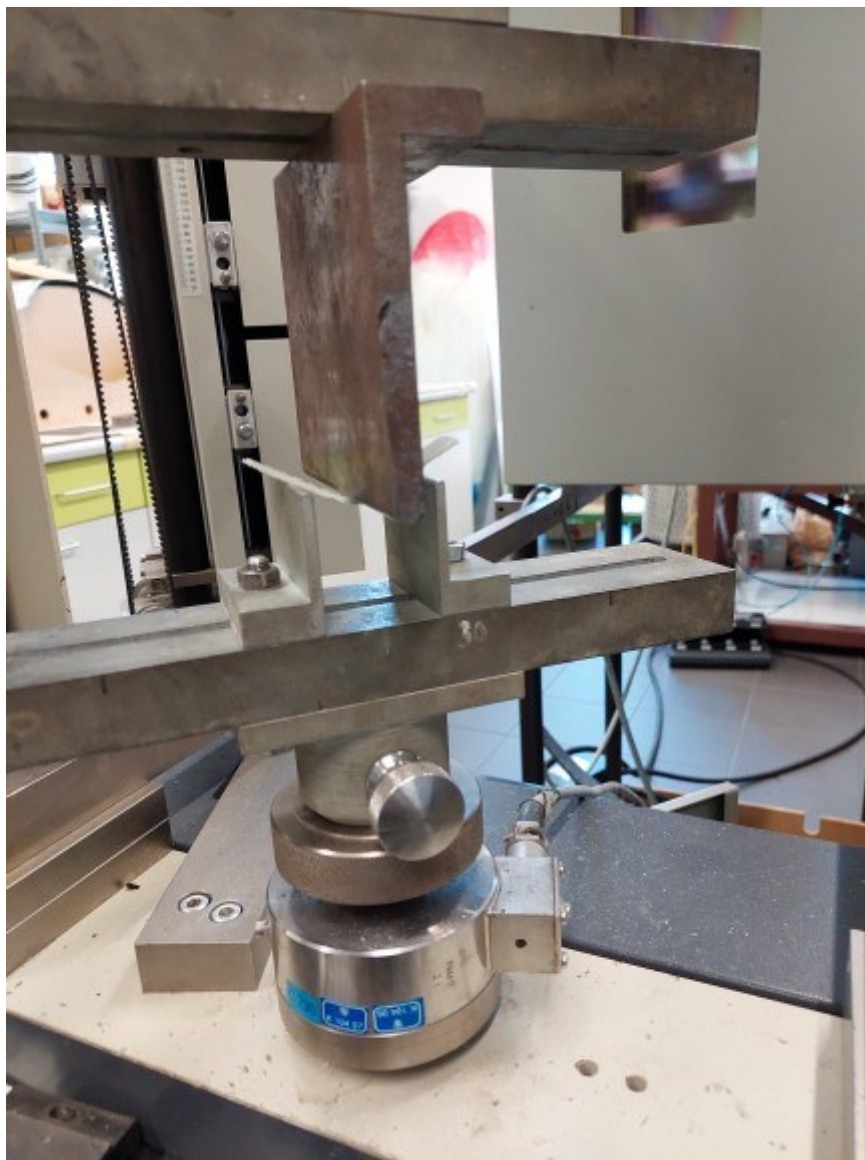
V tabulce č. 4 jsou naměřená data z tahové zkoušky. Odhad aritmetického průměru stanoveného z 10 měření s odhadem směrodatné odchylky pro modul pružnosti v tahu E_t u sklolaminátu vyrobeného bez pomoci vakua vykazuje $14315,2 \pm 1551,2$ MPa. Pro pevnost v tahu σ_t $287,7 \pm 21,9$ MPa a vykonaná práce W $9859,94 \pm 1613,81$ N.mm.

Tabulka č. 5 vykazuje naměřená data pro sklolaminát vyrobený s pomocí vakuové fólie. Odhad aritmetického průměru stanoveného z 10 měření s odhadem směrodatné odchylky pro modul pružnosti v tahu E_t činí $13262,4 \pm 1030,4$ MPa. Pro pevnost v tahu σ_t $251,2 \pm 19,7$ MPa a vykonaná práce W $7660,02 \pm 1350,7$ N.mm.

12.3.2 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem byla rovněž provedena na přístroji ZWICK ROELL 145 665. Podkladem byla norma ČSN EN ISO 14125 pro tříbodový ohyb. Pro porovnání bylo z každé série měřeno 9 zkušebních tělísek. Z měření byly posuzovány tyto parametry:

- napětí v ohybu σ_o [MPa]
- modul pružnosti v ohybu E_o [MPa]
- vykonaná práce W [N.mm]



Obrázek 33 Zatěžované zkušební tělísko ohybem

Tabulka 6 Přehled naměřených hodnot pro ohyb

	E_o	σ_o	W
$n = 9+9$	MPa	MPa	N.mm
1.l	10900	295	909,77
2.l	11900	273	1119,5
3.l	11800	246	583,62
4.l	11200	282	760,48
5.l	8640	292	920,88
6.l	10600	257	1197,6
7.l	10900	258	797,52
8.l	11500	284	856,92
9.l	11300	267	663,66
1.l	5090	117	267,9
2.l	6120	125	283,56
3.l	6000	128	265,66
4.l	5290	103	169,31
5.l	5460	108	208,52
6.l	5360	111	168,38
7.l	4580	115	248,3
8.l	5240	101	174,06
9.l	5050	113	236,12

Tabulka 7 Sklolaminát bez vakua

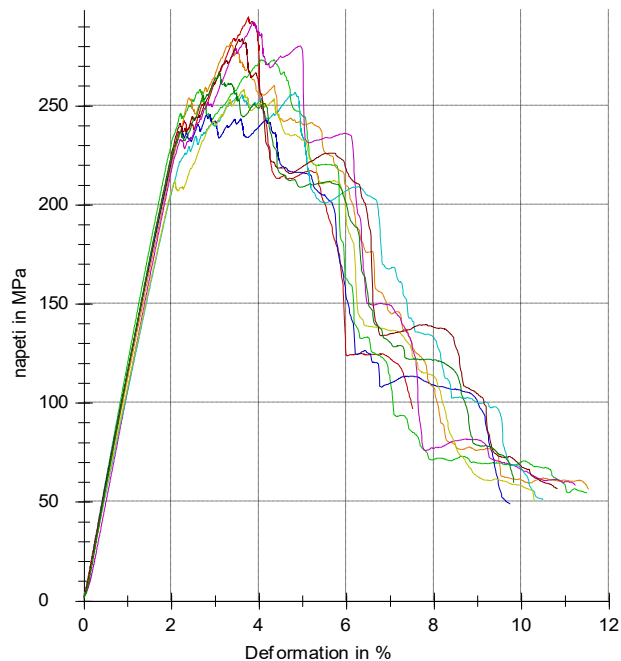
Sklolaminát bez vakua	E_o	σ_o	W
$n = 9$	MPa	MPa	N.mm
\bar{x}	11000	273	867,77
S_x	974	17	198,65
$\{n_y\}$	8,88	6,24	22,89

Tabulka 8 Sklolaminát s vakuem

Sklolaminát s vakuem	E_o	σ_o	W
$n = 9$	MPa	MPa	N.mm
\bar{x}	5360	113	224,65
S_x	474	9,11	45,77
$\{n_y\}$	8,86	8,04	20,38

V tabulce č. 7 jsou naměřená data z ohybové zkoušky. Odhad aritmetického průměru stanoveného z 9 měření s odhadem směrodatné odchylky pro modul pružnosti v ohybu E_o u sklolaminátu vyrobeného bez pomoci vakua vykazuje 11000 ± 974 MPa. Pro pevnost v ohybu σ_o 273 ± 17 MPa a vykonaná práce W $867,77 \pm 198,65$ N.mm.

Tabulka č. 8 vykazuje naměřená data pro sklolaminát vyrobený s pomocí vakuové fólie. Odhad aritmetického průměru stanoveného z 9 měření s odhadem směrodatné odchylky pro modul pružnosti v ohybu E_o činí 5360 ± 474 MPa. Pro pevnost v ohybu σ_o $113 \pm 9,11$ MPa a vykonaná práce W $224,65 \pm 45,77$ N.mm.



Obrázek 34 Diagram z přístroje Zwick Roell vyjadřující průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci



Obrázek 35 Zdeformované zkušební tělísko po zatížení ohybem

12.4 Vizuální a mikroskopické porovnání možných defektů

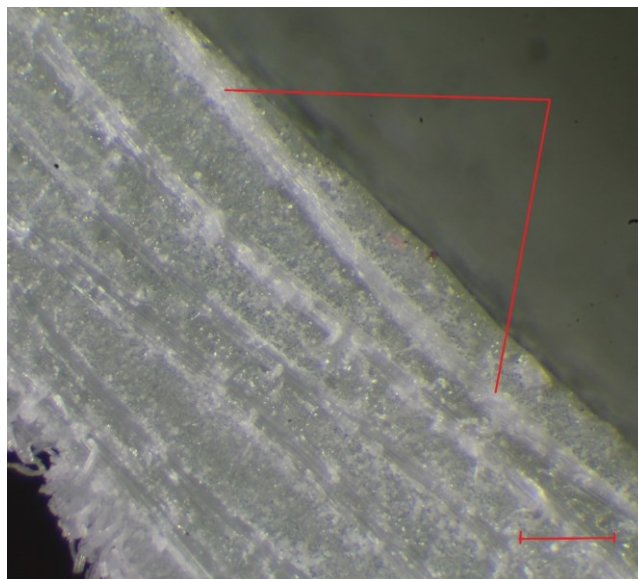
Pro obě vybrané technologie byla na výrobu zkušebních tělísek použita stejná výztuž. Vlastnosti této tkaniny byly tedy shodné pro obě metody. Vizuální kontrolou bylo zjištěno, že v některých místech na zkušebních tělíscích vyrobených ručním laminováním bez pomoci vakuové fólie, vznikly prázdná místa, tzv. dutiny. Tyto dutiny jsou soustředěny zejména na rozhraní každé vrstvy vyztužující tkaniny. Příčina jejich vzniku je důsledkem nedokonalého prosycení výztužných vrstev pryskyřicí a nedostatečným tlakem na přítlačný váleček při snaze o rovnoměrné rozložení pryskyřice během výrobního procesu. Je

diskutabilní, zda tyto vady ovlivnily mechanické vlastnosti vzhledem k naměřeným hodnotám.



Obrázek 36 Utvořená dutina na zkušebním tělísku

Detailnější mikroskopický pohled zachytil pouze výraznější vychýlení vrstvy výztuže. K podrobnější analýze je tedy nutné použít přesnější měřicí techniku.



Obrázek 37 Mikroskopický pohled

Mikroskopický foto snímek byl pořízen na mikroskopu Levenhuk Zoom 1T se zvětšením 30x.



Obrázek 38 Mikroskop Levenhuk Zoom 1T

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjistit, zda má výrobní technologie vláknových kompozitů vliv na jejich mechanické vlastnosti a mikrostrukturu. Vyrobené zkušební vzorky zvolenými metodami reprezentovaly skutečné výrobky z těchto materiálů, které byly vystaveny mechanickému namáhání. Pro výrobu zkušebních vzorků byla použita skelná tkanina, epoxidová pryskyřice a tužidlo od společnosti Havel Composites. K vyhodnocení parametrů byly zvoleny 4 ukazatele. První metoda srovnávala mechanické vlastnosti při tahovém zatížení. Další metoda vyhodnotila srovnání ohybových vlastností. Poslední metodou vyhodnocení bylo vizuální porovnání kvality zkušebních těles a pohled do mikrostruktury.

Zkouška tahem ukázala, že nepatrně lepšími mechanickými vlastnostmi disponují vzorky vyrobené klasickým ručním laminováním. Následné zatěžování ohybem už jednoznačně prokázalo, že i u této metody vykazují lepší mechanické parametry tělíka vyrobené metodou ručního laminování bez použití vakuové fólie. Při vizuální kontrole zkušebních tělísek byl zachycen defekt u jednoho ze vzorků vyrobeného bez pomoci vakua. Podezření na vzniklou dutinu v mikrostruktuře jednoznačně neprokázala zvolená mikroskopická technika. Závěrem lze ale konstatovat, že kvalitnější uspořádání výztužných vrstev měla výrazně lepší tělíka vyrobená metodou ručního laminování s vakuovou fólií.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, W. G. (2005). Polymerní kompozitní materiály, 351 p. Scientia, Prague. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] LIPTÁKOVÁ, T. (2012). Polymerní stavební materiály, 189 s. Žilinská univerzita, Žilina. ISBN 978-80-554-0505-6.
- [3] PTÁČEK, L. (2002). Nauka o materiálu II, 392 p. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. ISBN 80-7224-568-3.
- [4] HULL, D., CLYNE, T. W. (1996). An Introduction to Composite Materials, 326 s. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 0-521-38855-4.
- [5] AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J. (1987). Vláknové kompozity, č. 1, 296 s. SNTL, Praha.
- [6] NIU, M.C. Y. (1992). Kompozitní konstrukce draku letadla, 500 s. Conmilit Press Ltd., Hong Kong. ISBN 978-9627128069.
- [7] BAREŠ, R. (1988). Kompozitní materiály, 328 p. SNTL, Prague.
- [8] WEN, M., LUO, J. (2015). Studie o mechanických vlastnostech kompozitní pryskyřice matrice vyztužené vlákny. In: *Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 2, s. 243 – 249.
- [9] VALÁŠEK, P. MÜLLER, M. (2014). Obrazová analýza poruchových oblastí částicových kompozitů. In: *Manufacturing Technology* Vol 14, No 3, s. 474-478.
- [10] ZOLTEK. CarbonFiber [online]. [citováno 2017-02-02]. WWW: <<http://zoltek.com/carbonfiber/>>.
- [11] MORGAN, P. (2005). Uhlíková vlákna a jejich kompozity, 1153 s. Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida. ISBN-10 0-8247-0983-9.
- [12] KRETSIS, G. (1981). Přehled tahových, tlakových, ohybových a smykových vlastností hybridních plastů vyztužených vlákny. *Kompozity*, Vol. 18, č. 1, s. 13–23.
- [13] SWOLFS, Y., GORBATIKH, L., VERPOEST, I. (2014). Hybridizace vláken v polymerních kompozitech: Rewiew. *Kompozity: část a.*, 67(14), s. 181–200.
- [14] TECHNOLOGIE PLASTOVÝCH UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ. Ruční laminace. [online]. [citováno 2017-02-10]. WWW: <http://www.plastic.cz/technologie-ručni_laminace>.
- [15] JANČÁŘ, J. (2003). Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů, Vysoké učení technické v Brně, Brno. ISBN 80-214-2443-5.
- [16] PRŮVODCE KOMPOZITY. Přinášíme budoucnost kompozitních řešení. [online]. [citováno 2017-02-10]. WWW: <<http://www.gurit.com>>.
- [17] KORDCARBON. Produkty. [online]. [citováno 2017-02-03]. WWW: <<http://www.kordcarbon.cz/>>.
- [18] VALÁŠEK, P. (2016). Aplikace mikroskopie v experimentálním popisu skleněných práškových/epoxidových systémů. In: *Manufacturing Technology*, Vol 16, No 5, pp. 1183-1188.
- [19] BHAGWAN, D. AGARWAL. Vláknové kompozity. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [20] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-808-6960-296.
- [21] BERTHELOT, Jean-Marie. Composite materials: Mechanical behavior and structural analysis. New York: Springer, 1999. 645 p. ISBN 0387984267.

- [22] CHUNG, D. D. L. Composite materials: Science and applications. 2, illustrated edition. London: Springer, 2010. 349 p. ISBN 1848828306.
- [23] LE BELL-RÖNNLÖF, Anna-Maria. Fibre-Reinforced Composites as Root Canal Posts. Turku, Finland, 2007. 92 s. Dizertační práce. University of Turku, Institute of Dentistry. ISBN 978-951-29-3428-7.
- [24] CAMPBELL, F.C. Manufacturing processes for advanced composites. Oxford: Elsevier, 2004. ISBN 978-1-85617-415-2. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMPAC0002/viewerType:toc//root_slug:manufacturing-processes/url_slug:manufacturing-processes?b-q=Campbell%20-%20Manufacturing%20Processes%20for%20Advanced%20Composites
- [25] Hexcel., HexPly® Prepreg Technology [online]. ©2020 Hexcel Corporation [cit. 2020-11-9]. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf
- [26] Gurit.com [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Guide to composites.
- [27] Chavla, K.K.: Composite materials. Science and Engineering. 2nd ed., Springer Berlin, 1998
- [28] Ondráček, E., Vrbka, J., Janíček, P., Burša, J.: Mechanika těles. Pružnost a pevnost II. CERM, Brno, 2006
- [29] Havel Composites [online]. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu.html>
- [30] BARBERO, E. J.: Introduction to composite materials design, Third edition, 2018, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.
- [31] ŠUBA, O.: Mechanika polymerů a kompozitů, Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, ISBN 978-80-7454-015-8
- [32] ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s., ISBN 978-80-7318-948-8.
- [33] LIU, Ling, Bo-Ming ZHANG, Dian-Fu WANG a Zhan-Jun WU. Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. Composite Structures. 2006, (73), 303-309.
- [34] LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konštrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.
- [35] SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 9781842654910

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Tex	jemnost vlákna, 1 km vlákna v gramech
T _g	teplota skelného přechodu
RTM	resin transfer moulding
VARTM	vacuum assisted resin transfer moulding, RTM light
E _t	modul pružnosti v tahu
σ _{Pt}	pevnost v tahu
ρ	hustota
%	procento
ε _{f krit.}	tažnost
σ _o	pevnost v ohybu
E _o	modul pružnosti v ohybu
°C	stupeň Celsia
HDT	heat distortion temperature
MEKP	metyletylketon peroxid
mm	milimetr
m ²	metr čtvereční
g	gram
Ø	průměr
σ _{Pt} / ρ	měrná pevnost
μm	mikrometr
GPa	Giga Pascal
MPa	Mega Pascal
PVAL	Polyvinylalkohol
SMC	sheet moulding compouds

BMC	bulk moulding compounds
W	vykonaná práce
PES	Polyester
PE	Polyethylen

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Boeing 787 [6].....	11
Obrázek 2 Synergický efekt v kompozitním materiálu [11].....	13
Obrázek 3 Druhy tkaných vazeb [11]	23
Obrázek 4 Svazek skelných vláken [18].....	26
Obrázek 5 Přehled vlastností skelných vláken [12].....	27
Obrázek 6 Výroba skelných vláken taháním z trysek [15].....	27
Obrázek 7 Uhlíkové vlákno o průměru 6 μm [14].....	30
Obrázek 8 Rozdělení vláknových kompozitů dle výztuže [1].....	31
Obrázek 9 Mikroskopické znázornění defektů v kompozitním materiálu [9].....	32
Obrázek 10 Mikroskopická struktura kompozitu se skelnými vlákny	33
Obrázek 11 Aplikace tahového napětí na kompozitní materiál [8]	38
Obrázek 12 Aplikace tlakového napětí na kompozitní materiál [8]	39
Obrázek 13 Aplikace smykového napětí na kompozitní materiál [8]	39
Obrázek 14 Aplikace ohybového napětí na kompozitní materiál [8]	40
Obrázek 15 Modul pružnosti různých druhů vyztužení epoxidové pryskyřice skleněnými vlákny jako funkce úhlu zatížení β (obsah vláken asi 50 objem. %) [29]	41
Obrázek 16 Technologie ručního laminování [3].....	43
Obrázek 17 Technologie vytvrzování v autoklávu [3]	45
Obrázek 18 Technologie navíjení [2]	46
Obrázek 19 Metoda vakuového vaku [2].....	46
Obrázek 20 Technologie stříkání [2]	47
Obrázek 21 Technologie lisování za tepla a tlaku [2]	50
Obrázek 22 Technologie RTM [2].....	51
Obrázek 23 Schéma technologie tažení [2]	53
Obrázek 24 Vyrobené kompozitní desky.....	58
Obrázek 25 Ukázka zkušebního tělíska	59
Obrázek 26 Skelná výztuž	60
Obrázek 27 Použitá pryskyřice a tužidlo	61
Obrázek 28 Nanášecí a tlačný váleček	62
Obrázek 29 Zhotovené desky	62
Obrázek 30 Zhotovená deska po aplikaci vakua	63
Obrázek 31 Přístroj Zwick Roell	64
Obrázek 32 Zatěžované zkušební tělísko tahem.....	65
Obrázek 33 Zatěžované zkušební tělísko ohybem.....	68

Obrázek 34 Diagram z přístroje Zwick Roell vyjadřující průběh ohybového napětí v závislosti na deformaci	70
Obrázek 35 Zdeformované zkušební tělísko po zatížení ohybem	71
Obrázek 36 Utvořená dutina na zkušebním tělísku	72
Obrázek 37 Mikroskopický pohled.....	73
Obrázek 38 Mikroskop Levenhuk Zoom 1T	73

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti vybraných matricových materiálů

Tabulka 3 Přehled naměřených hodnot pro tah

Tabulka 4 Sklolaminát bez vakua

Tabulka 5 Sklolaminát s vakuem

Tabulka 6 Přehled naměřených hodnot pro ohyb

Tabulka 7 Sklolaminát bez vakua

Tabulka 8 Sklolaminát s vakuem

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Materiálový list skelné výztuže

Příloha 2 Materiálový list epoxidové pryskyřice

Příloha 3 Materiálový list tužidla

PŘÍLOHY:

www.havel-composites.cz

SKELNÉ VÝZTUŽE

Skelné vlákna se ve světě vyrábějí především ze sklovin označované jako sklo typu E. Základem E skla je soustava oxidů SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, B₂O₃. Dříve se vlákna vyráběla dvoustupňově, nejprve se ze sklovitého kmenu vytvářely tavěním při teplotě 1550°C kuličky o průměru 10-20 mm, které se dále tavily v platinových kotelcích, ze kterých se vytvářelo vlákno. Nověji jsou v provozu konstruktivní technologie, tzv. na jednom konci pece se sází sklovitý kmen a na druhém se z platinových vaniček vytahuje vlákno.

Toto vlákno má průměr nejčastěji od 3,5 do 20 um. Najednou se táhne 51 až 408 vláken. Vytážený pramenec vláken se navíjí na bubnu. Ještě před samotným navínutím je vlákno, které je samo o sobě velmi sroznivá a lámavé, opatřeno lubrikací a sreturou. Samotná lubrikace je nevhodná, protože by se sice zlepšila manipulovatelnost s vlákny, vlákna by však měla prakticky nulovou adhezi k polymericí matrici. Proto se již přímo ve výrobě vláken tato opatření tzv. sretační vrstvou, která zlepší vazbu mezi vláknem a pryskyřicí.

Aeroglass - Tkaniny ze skelné pláže typu E. Pláže má úpravu (slaziv) vhodnou pro většinu běžně používaných pryskyřic. Vzhledem k tomu, že úprava vláken neobsahuje vosk, jsou tkaniny vhodné zejména pro epoxidové pryskyřice. Tkaniny, které jsou upravené voskem, se sice dobře tkají (lépe kloužou po sobě a vlákna se o sebe nezastrhávají), nejsou však pro výrobu laminátů příliš vhodné. Vlákna upravená voskem jsou použitelná pouze pro pryskyřice s obsahem styrenu (polyester) a vinylestery, ale i zde vosk rozpouštěný v pryskyřici snižuje adhezi mezi jednotlivými vrstvami laminátu.

Úprava pláže, ze které jsou Aeroglass tkaniny vyráběny, je v podstatě povrchová úprava, které odebí jednotlivé vlákna pláže ihned při jejich výrobě tak, že je odolná proti vzdušné vlhkosti. Tato úprava se rozpouští až po prosycení pryskyřicí a díky tomu chrání pláž až do prosycení pryskyřicí.

Tkaniny z takto upravené pláže se hůře tkají, jelikož neobsahují vosk. Tkají se výrazně pomaleji a občas mohou obsahovat drobný defekt, který však neovlivní jejich užitnou hodnotu ani pevnost výsledného výrobku.

Aeroglass skelné tkaniny jsou vhodné pro výrobu letadel, lodí, autodiů, sportovního nářadí, průmyslových výrobků a krytů, ale také dražších epoxidových forem s požadavkem na velkou pevnost a dlouhou životnost.

SKELNÉ VÝZTUŽE

top quality product of Havel Composites Ltd.

composite material supplier & manufacturer

Typ	Parametry	Vazba
AEROGLA 88 17	17g/m ²	plátno
AEROGLA 88 26	25g/m ²	plátno
AEROGLA 88 48	20x20/cm	plátno, style1080
AEROGLA 88 80	12x12/cm	kepr 2/2, plátno
AEROGLA 88 110	16x15/cm	kepr 2/2, plátno
AEROGLA 88 130	10x10/cm	plátno
AEROGLA 88 140	8x7/cm	plátno
AEROGLA 88 163	12x12/cm	kepr 2/2, plátno
AEROGLA 88 200	16x13/cm	kepr 2/2
AEROGLA 88 200	8x7/cm	plátno
AEROGLA 88 220	6x4,5/cm	plátno
AEROGLA 88 230	8x7/cm	kepr 2/2, plátno
AEROGLA 88 380	8x7/cm	kepr 2/2, plátno
AEROGLA 88 380	6x6/cm	kepr 2/2, plátno

Aeroglass 110
Oblíbená skelná tkanina 102g/m² pro výrobu modelů. Je vhodná pro výrobu menších a středně velkých dílů. Jedná se spíše o uzavřenější tkaninu s menší propustností. I přesto se dobře prosycuje. Dodává se v plátnové a keprové 2/2 vazbě.

Aeroglass 130
Jemnější skelná tkanina 130g/m² s širokým použitím pro výrobu menších a středně velkých dílů. Patří mezi otevřenější tkaniny a je proto vhodná i pro vnitřní vrstvy laminátů. Rychle se prosycuje. Dodává se plátnové vazbě.

Aeroglass 140
Skelná tkanina 148g/m² často používaná pro první vrstvu středně velkých výrobků. Patří mezi těžší tkaniny, která se rychle prosycuje a poměrně jednoduše ukládá do forem. Může být také s úspěchem používána v kombinaci s jemnější tkaninou pro laminování otevřených povrchů s požadavkem na tenčí vrstvu. Častou aplikací, kde se tato tkanina používá, je výroba surfových prken a moto kapot.

Aeroglass 163
Skelná tkanina 158g/m² oblíbená zejména při výrobě laminátových dílů letadel různých kategorií. Je vhodná jako první a poslední vrstva, ale také jako konstrukční tkanina včetně vnitřních vrstev laminátů. Nejčastěji se používá v kombinaci s tkaninami 230-350g/m². Vzhledem k použití kvalitní úpravy vláken se velmi rychle prosycuje. Dodává se standardně v plátnové a keprové 2/2 vazbě.

Aeroglass 200
Středně hrubá skelná tkanina 158g/m² vhodná jako univerzální typ. Často používaná pro první a poslední vrstvy středně velkých laminátů. Je vhodná také jako konstrukční tkanina. Díky své konstrukci se při stříhání nešpejí a nevypadávají uvolněná vlákna a je odolná proti defektům při manipulaci a ukládání do forem. S úspěchem se dobře stříhá i v diagonálním směru. Dodává se v plátnové a keprové vazbě.

Aeroglass 230
Skelná tkanina 203g/m² je těžší tkanina z 150tek pláže. Oblíbená zejména pro snadné prosycování i poměrně hustou pryskyřicí. Je také vhodná všude tam, kde je nutné zvýšit obsah pryskyřice. Je také velmi vhodná pro nastavení do plastů a následné laminování s pryskyřicí. Pro svou konstrukci je také vhodným typem pro lmuž a RTM technologie. Dodává se v plátnové vazbě.

Aeroglass®
Skelné tkaniny Aeroglass

Aeroglass 48
Jemnější skelná tkanina 48g/m² vhodná pro první vrstvy laminátů. Je vhodná také pro výrobu modelů a malých dílů o menší tloušťce. Může být také použita jako poslední vrstva pro uzavření porů po hrudních tkaninách a rohových. Dodává se v plátnové vazbě.

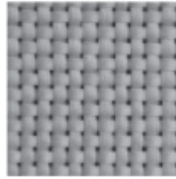
Aeroglass 80
Oblíbená skelná tkanina 79g/m² pro výrobu modelů. Díky nízké ceně je jednou z nejvíce používaných jemných skelných tkanin také při výrobě ostatních malých a středně velkých dílů. Patří mezi těžší tkaniny a díky tomu se velmi rychle prosycuje. Dodává se v plátnové a keprové 2/2 vazbě.

www.havel-composites.cz



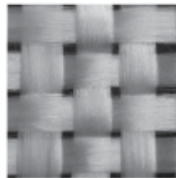
Aeroglass 280

Skeletová tkanina 257g/m². Oblíbená konstrukční tkanina vhodná zejména pro výrobu dílů ultralehkých letadel a větroňů. Také při výrobě ostatních dílů jako jsou autotopy a části sportovní nářadí tato tkanina vyniká dobrou barvosvetočností a snadným prosycováním. Dodává se v plátnové nebo keprové 2/2 vzábe.

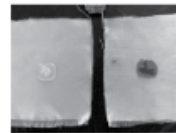


Aeroglass 380

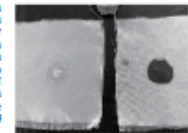
Skeletová tkanina 396g/m². Velmi oblíbená tkanina při výrobě laminátových dílů pro ultralehká letadla a větroňů. Tato konstrukční tkanina se také osvědčila při výrobě ostatních laminátových dílů, i přesto, že se jedná o poměrně těžší tkaninu, dobře se tvaruje a také prosycuje. Poměrně často se také používá pro výrobu kvalitních forem. Dodává se v plátnové a keprové 2/2 vzábe.



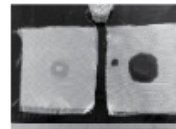
Test prosycení Aeroglass tkanin s běžně používanou tkaninou v závislosti na čase a použitému typu pryskyřice



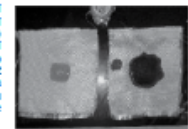
1 minuta po nanesení 2g LH 100



2 minuty po nanesení 2g LH 100



3 minuty po nanesení 2g LH 100

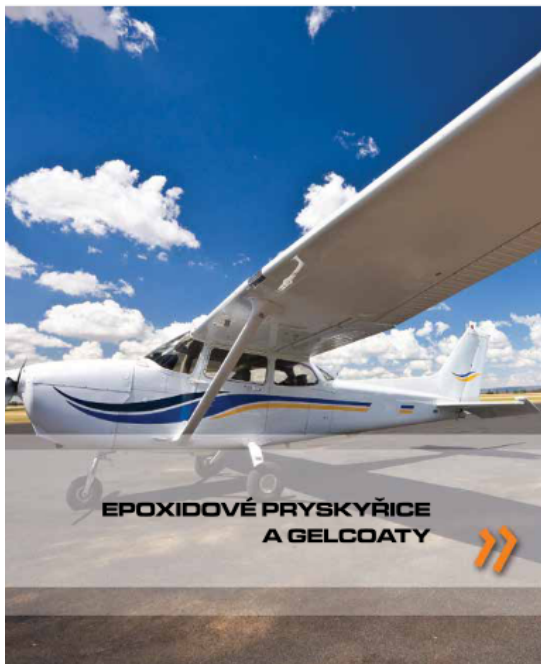


4 minuty po nanesení 2g LH 100

Po třech minutách od nanesení AEROGLOSS tkanina získává 3-násobně větší prosycenou plochu oproti standardní tkanině, u které k prosycení ani nedošlo. 4 minuty od nanesení pryskyřice je násobek AEROGLOSS v prosycené ploše 4 násobný. Vzorček vlevo stále neprosycen.



composite material supplier & manufacturer



EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE A GELCOATY

Epoxydové pryskyřice „překonávají“ většinu dalších typů pryskyřic v mechanických vlastnostech a v odolnosti vůči vnějším degradacím, a proto nacházejí exkluzivní uplatnění při stavbě letadlových součástí. Jsou také ideálními pryskyřicemi pro stavbu lodí díky jejich zvýšeným adhezivním vlastnostem a odolnosti vůči vodní degradaci. Zde jsou tyto pryskyřice široce používány jako primární konstrukční materiál na loď nebo jako sekundární aplikace pro pláště trupů či náhrada vodou degradované polyesterové pryskyřice a gelcoaty.

Epoxydové pryskyřice mají celou řadu užitečných vlastností, jsou rozpoznatelné podle žlutého nebo hnědého zabarvení.

Epoxydové pryskyřice jsou snadno a rychle vytvrditelné při jakékoliv teplotě v rozsahu od 5°C do 150°C v závislosti na výběru urychlovače tuhnutí. Jedná z nejvýhodnějších vlastností epoxidů je jejich malé smrštění během vytvrzování, což minimalizuje „prokopování“ tkaniny a vnitřní napětí. Výsoká adhezivní pevnost a vysoká mechanická vlastnosti jsou také navýšeny velkou elektrickou izolační schopností a dobrou chemickou odolností.

Epoxydy nacházejí uplatnění jako lepidla, těsnicí směsi, lič směsi, těsniva, laky a barvy, ale také jako laminární pryskyřice pro širokou paletu aplikací.

Epoxydové pryskyřice jsou sestaveny z dlouhých řetězcových molekulové struktury podobné vinylsterdům s reaktivními místy, situovanými na každém z konců řetězce. U epoxidových pryskyřic jsou reaktivní místa tvořena epoxy skupinami, namísto esterových skupin. Tato absence esterových skupin znamená mimořádně dobrou odolnost vůči vodnímu prostředí.

Epoxydy se od polyesterů liší tím, jak jsou vytvrzovány, vytvrzují se tvrdidlem spíše než katalyzátorem. Tvrdidlem je často křemík a je používáno na vytvrzování epoxidů „aditivní reakcí“.

U epoxidových pryskyřic je možné zrychlit vytvrzování aplikací tepla, což znamená, že čím vyšší teplota, tím rychlejší bude finální ztvrdnutí. To může být velmi užitečné, když vytvrzování jinak může trvat několik hodin až dnů při pokojové teplotě. Rychlé pravidlo hrubého odhadu zrychleného tepelného efektu pryskyřice je takové, že zvýšení o 10°C zhruba zvojnásobí reakční rychlost. Proto ještě pryskyřice zgelovatí v laminátu za 25 minut při 20°C, zgeluje také okolo 12 minut při 30°C, což se exotermicky mimořádně neprojevuje. Vytvrzování za vyšších teplot má ještě další výhodu, zvláště konečné mechanické vlastnosti materiálu.

Když porovnáme epoxidy s polyesterem a vinylsterem, výsledkem je velmi dobrá odolnost proti ohně právě u epoxidů, a je to zároveň jeden z mnoha důvodů, proč se využívají v letecko-kosmických konstrukcích.

- Výhody:**
- Velké mechanické a tepelné vlastnosti
 - Vysoká odolnost proti vodě
 - Možnost s nimi déle pracovat
 - Tepelná odolnost až do 140°C mokré/220°C suché
 - Nízké smrštění při vytvrzování

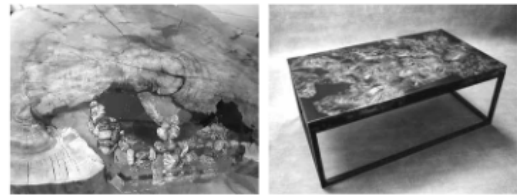
- Nevýhody:**
- Vyšší cena
 - Kritické poměry míchání
 - Žloutnutí

Epoxidové pryskyfice z produkce firmy Havel Composites:

Epoxidová pryskyfice	Popis
LH 145	Velmi nízká viskozita, odolnost proti krystalizaci. Vhodná pro výrobu sportovních potřeby, lodí a auto dílů. Tužidla: H 146, H 147, H 10, 133 – 136, 500 - 502
LH 160	Standardní laminační pryskyfice, nízká viskozita, vysoká tvrdost a chemická odolnost výrobků. Certifikovaná Germanische Lloyd. Výroba lodí a lodních doplňků, sportovních potřeb, modelů, forem a odličků. Náchylnější ke krystalizaci při nízkých teplotách. Tužidla: H 505 – H 512, H10, H 146, H 147, 285 – 287, 133 – 138,
LH 260	Čirá pryskyfice, odolná proti krystalizaci, vyšší viskozita než u LH 160. Odlišné aplikační možnosti jako u LH 160. K dispozici ve 3 dalších modifikacích: LH 260 a UV látkami stabilizujícími kompozit (obsahuje ultrakrátké mikročástice - zlepšují pevnost a odolnost proti UV záření), LH 260 s odpěňovadlem (rychlejší odstranění mikrobublinek), Retardexo LH 260 (omezí zduřetnost). Tužidla: H 505 – H 512, 285 – 287, 133 – 136, 500 - 502
LH 288	Speciální epoxidová pryskyfice s extrémně nízkou viskozitou. Je vhodná pro infuzní technologii. Produkty se vyznačují vysokou tvrdostí. Tužidla: H 282 – H 284, H 505, H 146, H 512.
LH 289	Vytváří hladký a lesklý povrch. Vrchní lak, glazura na umělý kámen. Nižší cena. Doporučené tužidlo H 289.
LH 300	Vyšší viskozita. Vysoká teplotní odolnost (až 150°C). Velmi důležité je dodržení přesného technologického postupu (viz. technický list). Doporučené tužidlo: H 513.
LH 385	alternativa k L285 MGS se vyznačuje nízkou viskozitou. Nabízí vysoce kvalitní aplikační vlastnosti jako vysoká mechanické vlastnosti, dobrou chemickou odolnost, výborné teplotní vlastnosti atd. Jedná se o pryskyfici nízké viskozity na bázi bisphenolu A. Viskozita: 400-300 mPas/25 °C. Při normálních skladovacích teplotách nedochází ke krystalizování. Přidáním směsi pryskyfice a doporučeného tužidla je jeho čerst. Zvláštní vlastnosti: Pryskyfice je i při teplotě 0 - 10°C čirá. Pryskyfice s tužidlem vytvoří před laminační nízkoviskozitní systém, který umožňuje dobrou směsí za současně vytlačení bublin z laminovaného povrchu. Doba zpracovatelnosti tzv. pot líte/ od přibližně 15 min. do asi 5 hodin podle použitého tužidla. Ideálními tužidly jsou H 285, H 286, H 287, H 146, H 512, H 535-538.

Další z nabídky epoxidových pryskyfic:

Epoxidová pryskyfice	Popis
L 285 MGS	Velmi kvalitní pryskyfice certifikovaná pro letecký průmysl a pro výrobu modelů. Pryskyfice s tužidlem vytváří velmi viskózní směs a díky tomu jsou vlákná rychle a kvalitně prosycena. Díky tomu má výrobek poostatně nižší hmotnost a vyšší užitkovou hodnotu. Tužidla: 265 – 267, 500.
C	Chemicky velmi odolná epoxidová pryskyfice. Použití při stavbě nádrží, ošeteren, potrubí. Tužidlo: C.
L	Dobrá adheze ke dřevu, ocelovým materiálům, plastům, keramice, styroporu a ostatním podobným materiálům. Tužidlo: L.
L 20	Obdoba epoxidové pryskyfice L, možnost použití tužidla: VE 3261.
Rivertable WWA-WWB	Epoxidový líc systém určený pro odlévání stolových desek tzv. Rivertable. Vyniká svou průzračností a díky sníženému exotermu možností odlit najednou visívu až 9 cm. Po vytvrzení je výrobek bezbarvý, pevný, broušitelný a leštelný.



Nabídka tužidel do epoxidových pryskyfic:

Tužidlo	Popis
133 MGS	Tužidlo pro vytvrzování epoxidových pryskyfic: LH 130, LH 145, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:35/váhově/ nebo 100:40/objemově/ Doba zpracovatelnosti 100g/20°C je 10 - 15 min.
135 MGS	Tužidlo pro vytvrzování epoxidových pryskyfic: LH 130, LH 145, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:35/váhově/ nebo 100:40/objemově/ Doba zpracovatelnosti 100g /20 C je 25 - 30 min.
136 MGS	Tužidlo pro vytvrzování epoxidových pryskyfic: LH 130, LH 145, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:35/váhově/ nebo 100:40/objemově/ Doba zpracovatelnosti 100g/20°C je 1 – 2 hod.
285 MGS	Tužidlo primárně určené pro vytvrzování epoxidové pryskyfice 285. Lze však použít i pro pryskyfice L, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:40 /váhově/ 100:50 /objemově/. Doba zpracovatelnosti 100g/20°C je 50 min.
286 MGS	Tužidlo primárně určené pro vytvrzování epoxidové pryskyfice 285. Lze však použít i pro pryskyfice L, LH 160, LH 260, LH 288. Poměr míchání je 100:40 /váhově/ 100:50 /objemově/. Doba zpracovatelnosti 100g/20°C je 2 hod.
287 MGS	Tužidlo primárně určené pro vytvrzování epoxidové pryskyfice 285. Lze však použít i pro pryskyfice L, LH 160, LH 260, LH 288. Poměr míchání je 100:40 /váhově/ 100:50 /objemově/. Doba zpracovatelnosti 100g/20°C je 4 hod.
386 MGS	Tužidlo pro vytvrzování epoxidové pryskyfice 385. Poměr míchání je 100:35 váhově 100:40 objemově. Doba zpracovatelnosti při 20°C je 5-6 hodin, 40 - 45°C 80 - 120 minut.
500 MGS	Velmi rychlé tužidlo pro epoxidové pryskyfice L 285, LH 130, LH 145, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:40 /váhově/ nebo 100:50 /objemově/. Doba zpracovatelnosti 100g/20°C je 10-15 min.
H 285	Alternativa tužidla 285 MGS, poměr míchání 100:40, doba zpracovatelnosti 50 min.
H 286	Alternativa tužidla 286 MGS, poměr míchání 100:40, doba zpracovatelnosti 2 hod.
H 287	Alternativa tužidla 287 MGS, poměr míchání 100:40, doba zpracovatelnosti 4 hod.
H 505	Tužidlo pro epoxidové pryskyfice LH 130, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:27. Doba zpracovatelnosti je 15 – 30 minut.
H 507	Tužidlo pro epoxidové pryskyfice LH 130, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:28. Doba zpracovatelnosti je cca 40 minut.
H 508	Tužidlo pro epoxidové pryskyfice LH 130, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:28. Doba zpracovatelnosti je cca 60 minut.

H 509	Tužidlo pro epoxidové pryskyfice LH 130, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:26. Doba zpracovatelnosti je 70 - 90 minut.
H 510	Tužidlo pro epoxidové pryskyfice LH 130, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:24. Doba zpracovatelnosti je 90 - 100 minut.
H 511	Tužidlo pro epoxidové pryskyfice LH 130, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:19. Doba zpracovatelnosti je 90 - 120 minut.
H 512	Tužidlo pro epoxidové pryskyfice LH 130, LH 160, LH 260. Poměr míchání je 100:23. Doba zpracovatelnosti je 150 - 180 minut.
H 513	Tužidlo pro epoxidové pryskyfice LH 300 a LH 301. Pro požadavky vysoké teplotní odolnosti. Poměr míchání je 100:23. Důležité dodržet přesný technologický postup. Žadejte technický list.
H 146	Kvalitní tužidlo pro vytvrzování epoxidových pryskyfic LH 160, LH 145 a LH 130. Poměr míchání je 100:30 váhově. Doba zpracovatelnosti 50-60 min. Minimální teplota vytvrzení 25 °C doporučeno je však 30°C a více.
H 147	Spíčkové tužidlo pro vytvrzování epoxidových pryskyfic LH 160, LH 145 a LH 130. Poměr míchání 100:25, pomale tužidlo s dobou zpracovatelnosti 90 min.
H 10	Speciální čirá tužidlo pro vytvrzování epoxidových pryskyfic LH 130, LH 145 a LH 160. Toto tužidlo je vhodné zejména pro aplikace, kde je požadavek na co nejvíce čistý laminační systém (např. pro poněkud vrstvy). Poměr míchání 100:45 (váhově) poměr míchání 100:50 je vhodný zejména pro tenčí vrstvy a potřebě rychle doby zpracovatelnosti. Doba zpracovatelnosti při cca 25°C a poměru 100:45 (váhově) je cca 20-25 minut a cca 15-20 minut při poměru 100:50 (váhově).
H 282	Tužidlo pro epoxid LH 288. Poměr míchání 100:23, zpracovatelnost 40 – 50 minut.
H 285	Tužidlo pro epoxid LH 288. Poměr míchání 100:19, zpracovatelnost cca 40 minut.
H 289	Tužidlo pro epoxid LH 289. Poměr míchání 100:33, zpracovatelnost 30 – 60 minut.
C	Tužidlo pro vytvrzování epoxidové pryskyfice C. Poměr míchání: 100:60/váhově/. Doba zpracovatelnosti: 50 min.
L	Tužidlo pro vytvrzování pryskyfice L, poměr míchání 100:40/váhově/, doba zpracovatelnosti 40 min.
VE 3261 (EPH 161)	Tužidlo pro vytvrzování epoxidové pryskyfice L 20. Poměr míchání: 100:25/váhově/. Doba zpracovatelnosti: 90 min. Nutno dodržet vytvrzovací předpis, viz technický list.

Poznámka: Poměry míchání u tužidel, která lze použít u více epoxidových pryskyfic, se vyznačují menšími mírami, než u tolerance ±2. Pro jistotu žadejte technické listy.