

Výzkum interlaminárního smyku u tkaninových kompozitů

Bc. David Rokos

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Rokos**

Osobní číslo: **T14551**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Výzkum interlaminárního smyku u tkaninových kompozitů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice vláknových kompozitů:
2. Základní definice, rozdělení polymerních kompozitních materiálů
3. Popis typů výztuží a maticí s ohledem na materiál
4. Technologie výroby vláknových kompozitů
5. Definice smyku a jeho význam u vláknových kompozitů
6. Způsoby testování smyku u kompozitních materiálů
7. Experimentální část
8. Volba materiálů výztuže a vhodné matrice
9. Výroba kompozitních panelů, příprava zkušebních těles
10. Mechanické zkoušky připravených vzorků
11. Zhodnocení naměřených dat, závěry

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ladislav Fojtl**
Ústav výrobního inženýrství

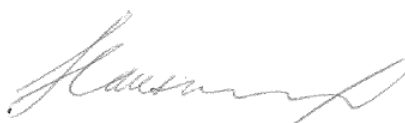
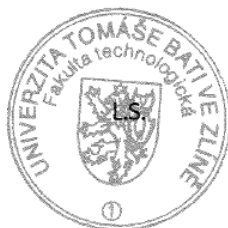
Datum zadání diplomové práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 6. května 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou 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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské 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.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na výzkum interlaminárního smyku u tkaninových kompozitů. V teoretické části práce je uveden úvod do kompozitních materiálů, kde je popsáno základní rozdělení kompozitních materiálů, dále jsou popsány nejčastěji používané matrice a vyztužující materiály. Rovněž jsou zde uvedeny a popsány nejběžněji používané technologie k výrobě kompozitů. Experimentální část práce se zabývá výrobou kompozitů s tkaninovou výztuží a následný výzkum interlaminárního smyku. Na výrobu laminátů je použita technologie ruční laminace pod pružnou folií. Připravené lamináty byly mechanicky otestovány na smyk dle tří norem k tomu určených. V závěru diplomové práce jsou vyhodnocena a diskutována naměřená data.

Klíčová slova: Kompozit, laminát, tkanina, ruční laminace, smyk, interlaminární smyk

ABSTRACT

The thesis is focused on the research of interlaminar shear in woven reinforced composites. Theoretical part of this thesis contains of introduction to composite materials, furthermore describes the most commonly used matrix and the reinforcing materials. Furthermore, the most commonly used tech. for the composites production are also mentioned and described. The experimental part deals with the production of composites reinforced with weave reinforcement and consecutive research interlaminar shear. At the laminate manufacturing technology is used, hand lay-up under elastic foil. Produced laminates were mechanically tested in shear according to three standards for this purpose. The end of the thesis contains evaluation and discussion of measured data.

Keywords: Composite, laminate, fabric, hand lay-up, shear, interlaminar shear

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi věnovali svůj čas a cenné rady při vypracování této práce.

Konkrétně patří velké dík za výborné vedení, odbornou pomoc, ochotu, obětavost a věcné připomínky při vypracování této práce panu Ing. Ladislavovi Fojtlovi. Dále bych chtěl také poděkovat kolegovi Bc. Vítovi Chovančíkovi, za spolupráci při tvorbě praktické části. V neposlední řadě patří velké dík mým rodičům za podporu po celou dobu mého studiu.

Tato diplomová práce byla spolufinancována z projektu Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně číslo IGA/FT/2016/002.

*„Co dosažením cílů získáte, není tolik důležité jako to,
čím se v průběhu cesty k těmto cílům stanete“*

(Zig Ziglar)

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	14
1.1.1 Dělení podle typu disperzní fáze.....	14
1.1.2 Podle charakteru a uspořádání výztuže	15
1.1.3 Dělení podle typu matrice	16
1.2 POLYMERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	16
1.2.1 Vlastnosti polymerních kompozitních materiálů	17
1.2.2 Rozdělení polymerních kompozitů	17
1.3 POPIS DRUHŮ MATRICE A VÝZTUŽE	18
1.3.1 Matrice	18
1.3.2 Materiály výztuže.....	22
1.3.3 Forma výztuže.....	24
1.3.4 Materiálové typy vláken.....	26
2 TECHNOLOGIE PRO VÝROBU VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	33
2.1 RUČNÍ LAMINOVÁNÍ	33
2.2 VAKUOVÁ INFUZE	34
2.3 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU / V PECE.....	35
2.4 STŘÍKÁNÍ.....	37
2.5 VYSOKOTLAKÉ VSTŘIKOVÁNÍ	37
2.6 VYSOKOTLAKÉ VSTŘIKOVÁNÍ POMOCÍ VAKUA- VARTM	39
2.7 RESIN FILM INFUSION- RFI.....	40
3 EXPERIMENTÁLNÍ VYŠETŘOVÁNÍ KOMPOZITŮ	41
3.1 SMYK	41
3.1.1 Závislost pevnosti ve smyku na směru namáhání	43
3.2 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ SMYKU U KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	44
3.2.1 Rovinné zkoušky smykem	44
3.2.2 Interlaminární smyková pevnost	45
3.3 NORMY PRO ZKOUŠENÍ SMYKU U KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	46
II PRAKTICKÁ ČÁST	49
4 CÍLE PRÁCE	50
5 POPIS MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ LAMINÁTŮ	51
5.1 VÝZTUŽ.....	51
5.2 MATRICE.....	52
5.2.1 Araldid GY 764BD pryskyřice pro ruční laminování.....	52
6 POPIS POMOCNÝCH MATERIÁLŮ POUŽITÝCH PŘI RUČNÍ LAMINACI POD PRUŽNOU FOLIÍ	53

6.1	SEPARAČNÍ ZÁKLADNÍ VOSK	53
6.2	ODTRHOVÁ TKANINA	53
6.3	ODSÁVACÍ ROHOŽ	54
6.4	PRUŽNÁ FOLIE	55
6.5	HADICE	56
6.6	TĚSNÍCÍ PÁSKA	56
6.7	VAKUOVÁ VÝVĚVA	57
6.8	PŘEPADOVÁ NÁDOBA (REZERVOÁR).....	58
7	VÝROBA LAMINÁTŮ S TKANINOVOU VÝZTUŽÍ.....	59
7.1	VÝROBA VZORKŮ POMOCÍ RUČNÍ LAMINACE POD PRUŽNOU FOLIÍ.....	59
7.1.1	Příprava formy	59
7.1.2	Příprava tkaniny	59
7.1.3	Příprava pryskyřice	60
7.1.4	Nános pryskyřice a kladení vrstev tkanin na formu.....	60
7.1.5	Kladení pomocných materiálů a stlačení pod pružnou folií.....	60
7.1.6	Úprava laminátové desky na vzorky	61
8	TESTOVÁNÍ VYROBENÝCH VZORKŮ	65
8.1	ZKOUŠKA ČSN 64 0662	66
8.1.1	Diskuze výsledků zkoušky ČSN 64 0662	68
8.2	ZKOUŠKA ČSN EN ISO 14 130.....	70
8.2.1	Diskuze výsledků zkoušky ČSN EN ISO 14 130	72
8.3	ZKOUŠKA ČSN EN ISO 15 310.....	73
8.3.1	Diskuze výsledků zkoušky ČSN EN ISO 15 310	77
	ZÁVĚR	79
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	81
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ	87
	SEZNAM TABULEK.....	90
	SEZNAM PŘÍLOH.....	91

ÚVOD

Příroda užívá kompozitních materiálů již dávno. Skvělým kompozitem jsou kosti, pavoučí vlákno, lastury živočichů i dřevo. Všechny tyto příklady obsahují kombinaci pevných a pružných vrstev a dodávají výslednému produktu obdivuhodné vlastnosti. Naši předkové využívali kompozity různým způsobem, historicky nejznámější příklad technicky dokonalého výrobku jsou mongolské luky využívající pevné dřevo a pružnou šlachovitou výztuž. [1]

Kompozity jsou kombinace dvou či více materiálů, lišících se tvarem nebo složením. Jednotlivé složky jsou výrazně zastoupeny (alespoň 5 %) a zachovávají si svou identitu, nijak se tedy nerozpouštějí ani neslučují, obsahují zřetelně odlišitelné složky, které se výrazně liší svými vlastnostmi. Na jak podrobné úrovni jsou tyto složky rozlišitelné, dle toho tyto školně dělíme na makrokompozity (rozeznatelné okem, lupou), mikrokompozity (rozeznatelné mikroskopy) a nanokompozity (zde už se ale musíme ptát, kde je ona hranice rozlišitelnosti a oddělenosti složek). [1]

Ve všech těchto případech se jedná o kompozitní materiál – o složený materiál, vzniklý umělým spojením rozličných materiálů. Při tomto procesu získává vlastnosti, které jeho jednotlivé komponenty nemají. Třeba ve stomatologii se kompozitem myslí výplňový materiál složený ze skla a pryskyřičného pojiva. Jedním z nejznámějších kompozitních materiálů je železobeton, což je kompozit z ocelových drátů a betonu. (Beton je tedy kompozit z kameniva a cementu). Jiným známým zástupcem je skelný laminát - kompozit ze skleněných vláken a pryskyřice, obvykle polyesterové. Hojně užívaný kompozitní materiál je také asfaltová směs na výrobu povrchu komunikací. Dalšími zástupci jsou kompozity z vláken uhlíkových a aramidových, ze kterých se vyrábějí extrémně pevné a lehké díly pro konstrukce letadel a raket. Užití mají i v automobilovém průmyslu, v ozbrojených složkách (kevlarové neprůstřelné vesty či ochranné helmy) a v řadě dalších oblastech. V neposlední řadě se čím dál tím častěji nahrazují minerální a syntetické výztuže přírodním materiálem. Vlákna třeba bambusu, lnu, juty, bavlny, celulózy, případně vlna ovcí či velbloudů, mohou totiž významně zlepšit vlastnosti materiálů, resp. výrobků. Další výhodou přírodních vláken je jejich nízká hmotnost, nízká abraze forem, spalitelnost, netoxičnost, biodegradabilita a především nízká cena, nezávislá na ceně ropy. Obvykle jedna ze součástí dodává výrobku pevnost a druhá slouží jako pojivo. Vyrábějí se i tříslložkové kompozity, které tvoří nosná složka (vlákna, střiž, tkanina, termoplastická folie), pojivo

(reaktoplastické a termoplastické pryskyřice, kaučuky) a plnivo (anorganické – slída, křemen, sklo či organické pojivo - třeba dřevěná moučka). [2]

V dnešní době se kompozitní materiály využívají v chemickém, stavebním, automobilovém, leteckém průmyslu a v mnoha dalších odvětvích. Hlavními výhodami vzniklých kompozitních materiálů je zvýšená tuhost, pevnost, houževnatost, stabilita a odolnost vůči korozi nebo chemickému prostředí. Pro výrobu kompozitních materiálů se používala a stále používá jedna z prvních technologií- ruční laminace. Nadále se technologie výroby kompozitů vyvíjela a dnes je již několik druhů technologie pro výrobu laminátu, jako je například vakuová infuze, pultruze, RTM, VARTM, RFI, atd. [3]

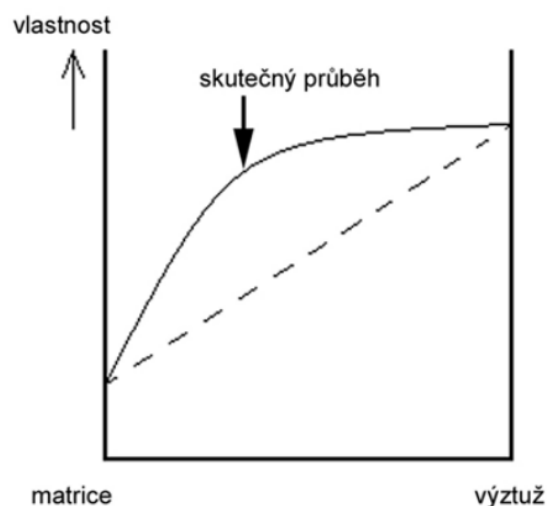
Výzkum této práce je zaměřen na výrobu kompozitního materiálu s tkaninovou výztuží (juta, sklo, uhlík), který je vyroben pomocí ruční laminace a následného stlačení pod pružnou folií. Vyrobené a připravené kompozitní vzorky jsou porovnány na základě jejich interlaminárních smykových vlastností.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozit je materiálový systém složený z více fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, kdy tento systém dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy ani prostým sečtením- tzv. synergický efekt (Obr. 1). Vzniká tedy nový materiál se specifickými vlastnostmi. Tužší, tvrdší a pevnější nespojitá složka je nazývána výztuž, spojitá je obvykle poddajnější složka- matrice, která zastává funkci pojiva výztuže. [4, 5, 6, 7]

Typickým příkladem synergického chování je kompozit, který je složený z keramické matrice vyztužené keramickými vlákny. I když vlákna i matrice jsou samostatně velmi křehké, tak výsledný kompozit je charakteristický určitým rozsahem houževnatosti, tedy lepší odolností proti náhlému křehkému porušení. Synergismus je efekt velmi významný, protože umožňuje získávání materiálu se zcela novými vlastnostmi. [8, 9]



Obr. 1 Znárodnění synergického efektu v kompozitním materiálu [8]

Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky:

- Podíl výztuže musí být větší než 5%.
- Vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální, chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice.
- Kompozit musí být připraven smícháním složek.

Podle těchto podmínek nelze za kompozit považovat plast, obsahující malá množství tuhých barviv, nebo částic elastomerů (přidávaných pro zlepšení houževnatosti), ani slitinu kovu, v které během ochlazování nebo při tepelném zpracování došlo k vyloučení tvrdé fáze. [7]

V následujícím obrázku (Obr. 2) jsou vyobrazeny příklady kompozitních dílců, které jsou použity u letadla Airbus A380.



Obr. 2 Využití kompozitních materiálů v případě Airbus A380 [10]

1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

V dostupné literatuře se nachází různá kategoričká rozdělení, neboť v praxi se používá velké množství kompozitních materiálů. Většina autorů uvádí dělení podle následujících tří kritérií:

- Dle disperzní fáze,
- Dle geometrie a orientace výztuže,
- Dle typu matrice.

1.1.1 Dělení podle typu disperzní fáze

Dle tohoto dělení se kompozity rozdělují do tří základních typů:

- Kompozity prvního typu

Disperze (jedna i více) je tvořena z pevné fáze. Tyto kompozity se používají v technice nejčastěji. [8]

- Kompozity druhého typu

Velmi málo používané, kdy je disperze kapalného skupenství. Například se jedná o některé materiály samomazných ložisek (spékaný kov s disperzí oleje), nebo spékané kovy pro ložiska vodních strojů (čerpadlo, pracující pod hladinou). [8]

- Kompozity třetího typu

Jedná se o disperzi plynového charakteru, kde patří především pěnové materiály. Například pěnoplasty, kovové pěny atd. [8]

1.1.2 Podle charakteru a uspořádání výztuže

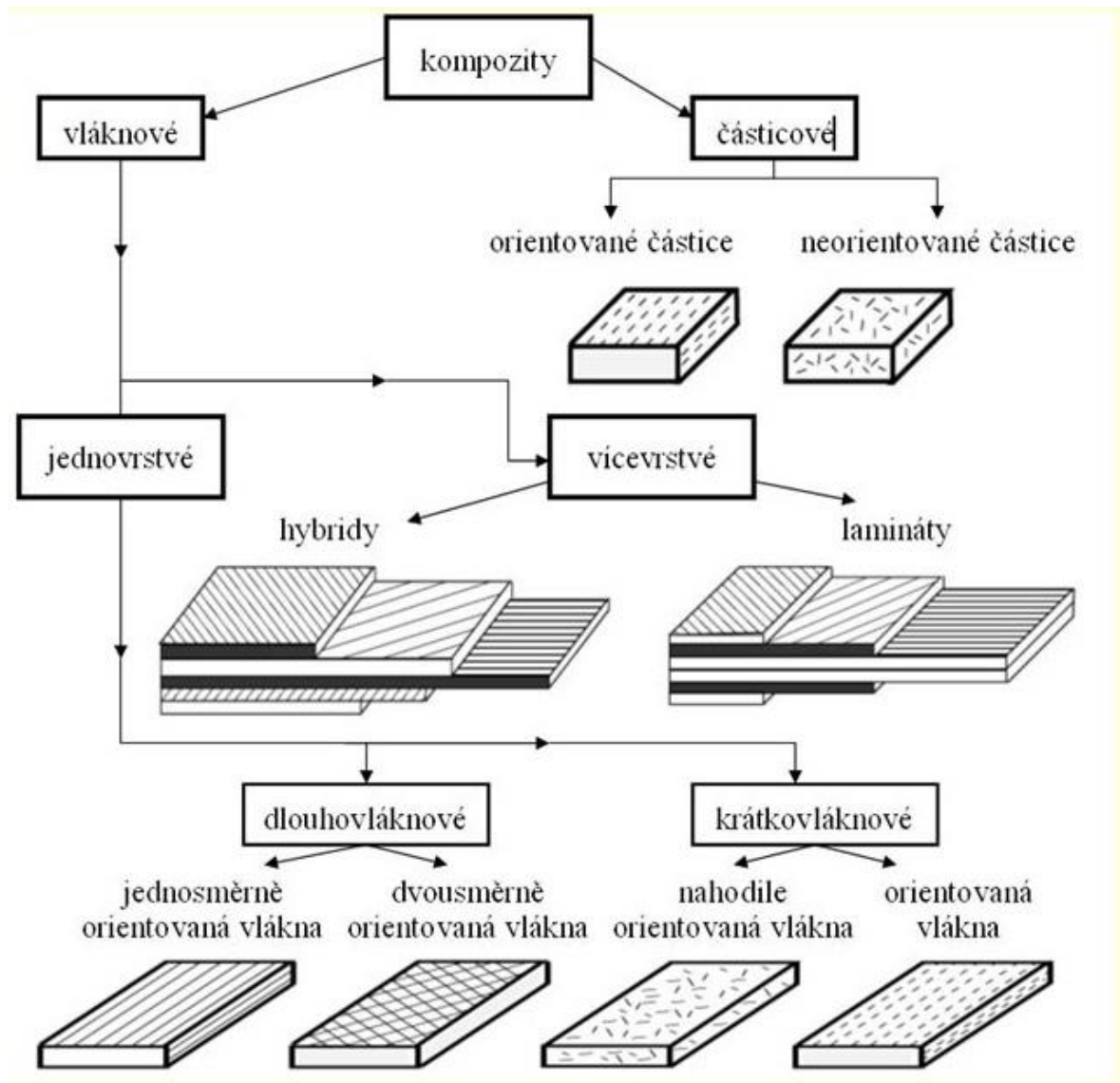
Dle uspořádání a tvaru výztuže dělíme dále kompozity na dvě základní skupiny:

- Částicové kompozity
 - Destičkové částice (anizometrické)
 - Náhodná orientace
 - Preferovaná orientace
 - Sférické částice (izometrické)
- Vlákňové kompozity

Je zde možno využít celou řadu kritérií. Jedním z nejčastěji používaných dělicích kritérií je orientace a délka vyztužujících vláken. Z tohoto hlediska je možné dělit vlákňové kompozity na:

- Jednovrstvé
 - S krátkými vlákny (délka/průměr $L/D < 100$)
 - S dlouhými vlákny ($L/D > 100$)
 - S kontinuálními vlákny (délky vláken jsou rovny rozměrům celého dílce)
- Vícevrstvé
 - Sendviče
 - Lamináty [11]

Následující schéma (Obr. 3) popisuje základní strukturu dělení kompozitů dle výztuže.



Obr. 3 Rozdělení kompozitů [12]

1.1.3 Dělení podle typu matrice

- Kompozity s kovovou matricí
- Kompozity s keramickou matricí
- Kompozity polymerovou matricí (termoplastickou, reaktoplastickou, elastomerní)
- Kompozity s uhlíkovou matricí [11]

1.2 Polymerní kompozitní materiály

Tyto materiály lze definovat jako polymery, které jsou vyztuženy buď vlákny, nebo částicovým plnivem. Vlákna mohou být například z uhlíku, skla, aramidu, atd. Známe tři

druhy polymerních matric a to termoplastickou (např. polypropylen, polyamid, polykarbonát, atd), reaktoplastickou (např. nenasycený polyester, epoxidové pryskyřice, atd), nebo elastomerní (např. sesíťovaný styren-butadien, akrylonitril-butadien, atd). [13]

1.2.1 Vlastnosti polymerních kompozitních materiálů

Vlastnosti polymerních kompozitů poukazují na perspektivu těchto materiálů v různých odvětvích (např.: strojírenství, stavebnictví, atd.). Polymerní kompozitní materiály se vyznačují především nízkou hmotností při zachování vysokých hodnot mechanických vlastností. Můžou se mechanickými vlastnostmi vyrovnat i ocelím. Dále mají i jiné důležité vlastnosti a to možnost tlumit rázy, zvyšovat životnost a bezpečnost konstrukce a mají menší požadavky na údržbu. Jednou z důležitých vlastností a zároveň výhodou je možnost kombinace matrice a výztuže s ohledem na požadované konečné vlastnosti dílu. Na rozdíl od ocelí může být kompozit anizotropní materiál, pokud se to požaduje. Anizotropie znamená, že součást má různé vlastnosti v různých směrech. [13]

1.2.2 Rozdělení polymerních kompozitů

Z hlediska klasifikace podle typu matrice se nejčastěji používají dva typy polymerních pojiv a to reaktoplasty a termoplasty (Obr. 4). [4]

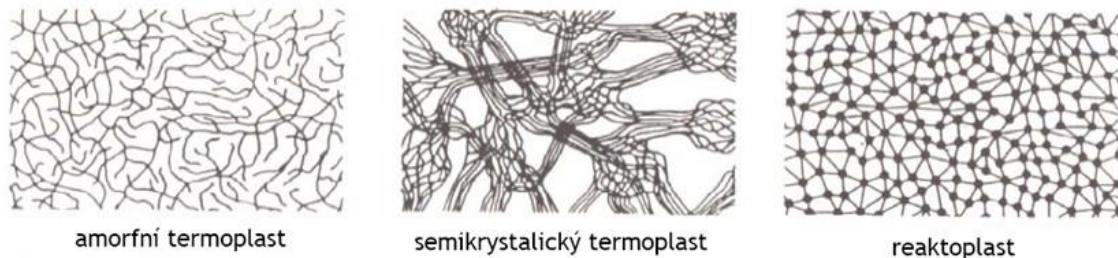
- Reaktoplasty

Do skupiny reaktoplastů patří pryskyřice, které se vytvrzují přidáním katalyzátorů, urychlovačů, atd., případně dodáním energie (teplo, záření). Mezi takové zástupce reaktoplastů patří například epoxidové pryskyřice, nenasycené polyesterové pryskyřice, vinylové pryskyřice či fenolické pryskyřice. Tyto pryskyřice jsou většinou dodávány ve formě viskózních tekutin s konzistencí tekutého medu, tvořené relativně malými molekulami, kterou jsou následně vytvrzeny chemickou reakcí. Kompozity u nichž je matrice z reaktoplastické pryskyřice mají mezi konstrukčními aplikacemi vláknových kompozitů naprostou převahu. [4]

- Termoplasty

Mezi zástupce termoplastů patří například polystyren, polypropylen, polyetylen, polykarbonát, PET a další. Jedná se o látky, které jsou tuhé a měknou a tečou při zvýšení teploty nad danou hodnotu charakteristickou pro daný polymer, kdy po ochlazení přechází zpět do pevného skupenství. Charakteristickým strukturním znakem termoplastů jsou velmi

dlouhé molekuly (makromolekuly) vytvořené opakováním stejných strukturních jednotek. Jednotlivé makromolekuly nejsou vzájemně vázány chemickými vazbami. Vzájemné interakce, které zaručují kohezní pevnost polymerního tělesa, jsou většinou slabé. [4]



Obr. 4 Nadmolekulární struktura polymeru [14]

1.3 Popis druhů matrice a výztuže

1.3.1 Matrice

Jelikož budou v experimentální části práce vyráběny polymerní kompozity, bude následující kapitola zaměřena na matrice (pojivo) na polymerové bázi. V textu budou tudíž vynechány výše zmíněné keramické, uhlíkové a kovové pojiva.

Matrice neboli pojivo je materiál, který se používá na prosycení systému vláken či partikulárních komponent tak, že vznikne tvarově stálý výrobek. Úlohou matrice v kompozitu je jak spojovat výztuže dohromady, tak výztuž chránit před chemickými nebo mechanickými vlivy. Dále slouží k přenosu napětí namáhání na vlákna, k převedení namáhání z vlákna na vlákno a zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku. [13]

Matrice by měla mít vhodné povrchové napětí a viskozitu, aby dokázala vlákna ideálně smočit. Aby matrice dosáhla ideálních vlastností pro namáčení, používají se rozpouštědla a následně tvrdidla, která naopak pomáhají matici vytvrdit. [11]

Mezi nejčastěji používané matrice patří nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP) a z termoplastů polypropyleny (PP) a polyamidy (PA). Matrice na bázi pryskyřic ať už reaktoplastických nebo termoplastických se používají pro polymerní kompozity. Nejdůležitější vlastnosti, podle kterých jsou matrice posuzovány, jsou uvedeny v následující tabulce. [11]

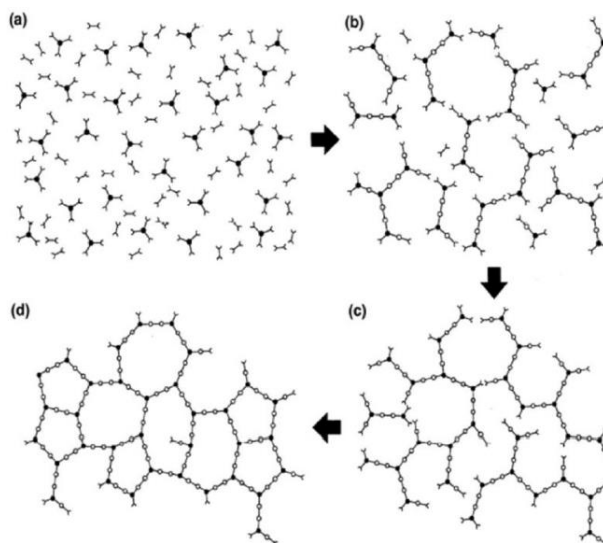
Tab. 1 Vlastnosti pryskyřic [11]

Užitné vlastnosti	Technologické vlastnosti
Pevnost	Viskozita pryskyřice
Modul pružnosti	Smáčivost vláken
Prodloužení při přetržení	Doba gelace
Houževnatost	Skladovatelnost
Odolnost proti tečení	Reakční rychlost
Tepelná odolnost	Recyklace
Hořlavost	Obsah těkavých složek
Navlhavost	Smrštění při reakci
Odolnost proti UV záření	Citlivost na poměr složek
Dielektrické vlastnosti	Vedlejší produkty vytvrzování
Chemická odolnost	Adheze k povrchu formy

- Reaktivní pryskyřice

Tvoří skupinu reaktoplastů nejčastěji používanou při výrobě vláknových polymerních kompozitů. Jedná se o tavitelné nebo kapalné pryskyřice. Tyto pryskyřice se samostatně nebo za pomoci dalších složek (tvrdidel, iniciátorů, katalyzátorů aldehydů, urychlovačů apod.) vytvrzují polyadící nebo polymerací bez odštěpení těkavých složek. Reaktivní pryskyřice se také nazývají jako licí, laminační, impregnační, prosyncovací nebo zalévací. [13, 15]

Reaktivní pryskyřice se vytvrzují smícháním s tvrdidly. Tvrdidla jsou sloučeniny, které iniciují katalyticky polymerizaci pryskyřic, případně ovlivňují vytvrzování v průběhu polyadice epoxidových nebo izokyanátových pryskyřic. Urychlovače, které jsou přidány v malém množství, urychlují síťovací reakci. Při procesu síťování dochází ke zvyšování viskozity vlivem nárůstu molekulární hmotnosti. Nezvratný přechod z tekutého do gelového stavu se nazývá bod gelace. Proces vytvrzení je znázorněn na (Obr. 5). [13,15]

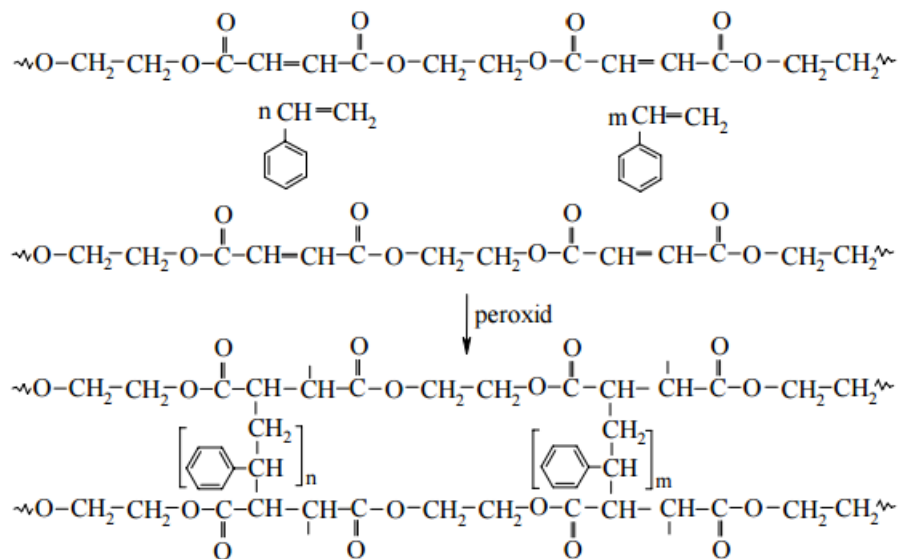


Obr. 5 Zjednodušené schéma procesu vytvrzení reaktoplastu. (a) Monomery a oli-gomery. (b) Proces růstu a větvení při zvyšování viskozity. (c) Gelový stav za nevratným bodem gelace. (d) Plně vytvrzený reaktoplast [8]

- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Uplatňuje se v kompozitních materiálech nejvíce, je známa už od roku 1936. Jedná se o bezbarví až slabě nažloutlí roztok pryskyřice v reaktivním rozpouštědle. Lze ji vytvrzovat za normální nebo zvýšené teploty, bez vzniku vedlejších těkavých produktů. Během vytvrzování se uvolňuje reakční teplo a následkem toho dochází k objemovému smrštění o 5 až 9 %. Nenasycené polyesterové pryskyřice patří mezi levné, spolehlivé a mnohostranně použitelné licí pryskyřice. Dále mají dobrou odolnost proti povětrnosti, ale zároveň mají velké smrštění a velké nároky na životní prostředí působením styrenu. [4, 8]

V praxi se pojmem nenasycené polyesterové pryskyřice označují roztoky lineárních nenasycených polyesterů v monomerech, které polymerizují řetězovým mechanismem, obvykle ve styrenu, méně často např. v methyl-methakrylátu, vinyltoluenu nebo dialkylftalátu. Nenasycené polyestery se připravují polykondenzací směsi nenasycených a nasycených dikarboxylových kyselin, případně anhydridů, s dioly. Využívá se k tomu především maleinanhydrid nebo kyselina fumarová a ftalanhydrid, z diolů, ethan-1,2-diol a propan-1,2-diol. Radikálovou kopolymerizací dvojných vazeb v řetězcích polyesteru se styrenem dochází k vytvrzování – vzniku sesíťované struktury (Obr. 6). [16]

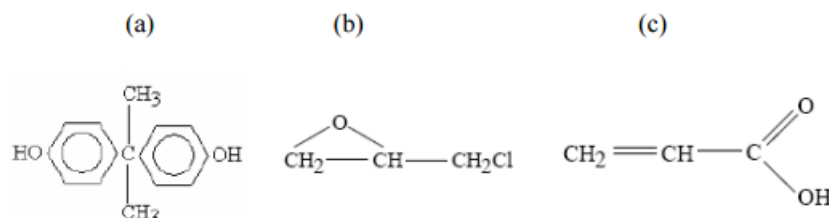


Obr. 6 Vznik zesíťované struktury [16]

○ Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Jedná se o pryskyřice, které jsou velmi vhodné pro výrobu polymerních kompozitů vyztužených skleněnými nebo uhlíkovými vlákny určených pro náročnější aplikace. Tyto pryskyřice se hodí hlavně do agresivního chemického prostředí a také pro kompozity, které jsou vystavené velkému mechanickému namáhání. Těmito pryskyřicemi se mohou nahradit ve většině případů například epoxidové pryskyřice, není-li vyžadováno speciálních elektrických vlastností. Použití VE-R je hlavně v oblastech s vysokým korozním namáháním jako jsou třeba pračky, potrubí, přepravní nádrže, chladicí věže, atd. Vzhledem ke své houževnatosti se používají také pro nosníky nárazníků a díky vysoké pevnosti se také používají u velkých nosných konstrukcí. [4, 13]

Základními surovinami pro výrobu VE-R je bisfenol A neboli dian (Obr. 7a), epichlorhydrin (Obr. 7b) a kyselina akrylová (Obr. 7c). [4]

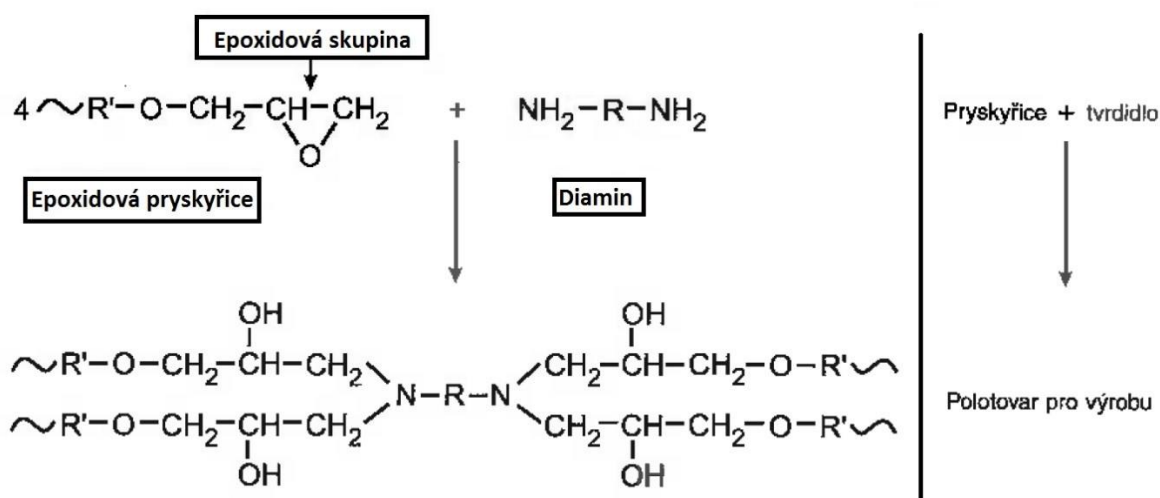


Obr. 7 Základní suroviny pro výrobu VE-R [4]

○ Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Epoxidové pryskyřice jsou bezbarvé, nažloutlé hmoty, které mají konzistenci kapalin. Za běžných podmínek jsou prakticky neomezeně skladovatelné. Řadí se mezi velice významné termosety s velmi hodnotnými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stabilitou a přiléhavostí k podkladu. Výsledkem značně dobrých mechanických, elektrických vlastností a vysoké reaktivitě se rozšířili aplikace EP-R v lepidlech, pojivech pro lamináty, zalévacích a lisovacích hmotách a lékařských pryskyřicích. Během vytvrzování vzniká jen malé celkové polymerační smrštění kolem 2 %, a proto je vhodná pro výrobu kompozitů a výrobky s požadavky na precizní rozměry, kde je díky tomuto minimálnímu smrštění minimalizováno vnitřní pnutí a to i ve velkých dílcích. Nízkomolekulární typy jsou rozpustné v aromatických uhlovodících a vysokomolekulární hlavně v ketonech a v esterech. EP odolávají velmi dobře zásadám i zředěným roztokům anorganických a organických kyselin. Jejich chemická odolnost stoupá s molekulovou hmotností a stupněm zesíťování. [4, 13, 15, 17]

Následující obrázek (Obr. 8) znázorňuje polyadiční reakci mezi pryskyřicí a tvrdidlem (diaminem).



Obr. 8 Chemická reakce v epoxidové pryskyřici [18]

1.3.2 Materiály výztuže

Základním úkolem výztuže v kompozitním materiálu je zejména zaručit mechanické vlastnosti materiálu a to hlavně tuhost a pevnost. Hlavním strukturním parametrem, který určuje výsledné vlastnosti kompozitu, je druh výztuže a její uspořádání. Nejčastěji užívaným typem výztuže jsou skleněná vlákna, uhlíková vlákna a kevlarová vlákna. Skleněná vlákna dávají kompozitu všeobecně dobré vlastnosti, zatímco uhlíková vlákna dodávají vysokou

tuhost. Kevlarová vlákna zase umožní, aby profil odolával rázům. Profily, které jsou vyztužené skleněným vláknem, zajišťují elektrickou izolaci i elektromagnetickou transparentnost, kdežto karbonová vlákna zajišťují elektrickou vodivost profilů. Nejčastěji používanou výztuží ve vláknových kompozitech vyráběných tažením, navíjením i jinými technikami jsou skleněná vlákna. [11, 12]

Kompozitní materiály můžou pojímat vyztužující fáze rozdílných rozměrů a materiálů. Největší rozměry vyztužující fáze mají makrokompozity. U těchto makrokompozitů se pohybuje velikost příčného rozměru kolem 100 mm a uplatnění mají zejména ve stavebnictví (železobeton). Následují menší rozměry výztuže a to mikrokompozity a ty mají příčný rozměr výztuže v rozmezí 10^0 až 10^2 μm . Nejmenší rozměry výztuže mají nanokompozity, které mají průměr nebo délku vlákna v řádu 100 nm. [6, 11]

- **Částicové výztuže**

Kompozity zpevněné částicemi mají makroskopicky izotropní vlastnosti. V kompozitech s kovovou maticí se jako plnivo používají nekovové minerální materiály oxidické, karbidické, boridické a jiné. V případě polymerních kompozitů jsou nejčastěji používanými částicovými plnivy hydroxid hlinitý, azbest, CaCO_3 , vápenec, křída, celulózové produkty, sklo, SiO_2 , silikáty a mnoho dalších. Moderní jsou aplikace nových přírodních i syntetických plniv se specifickými geometrickými tvary částic. [6, 9]

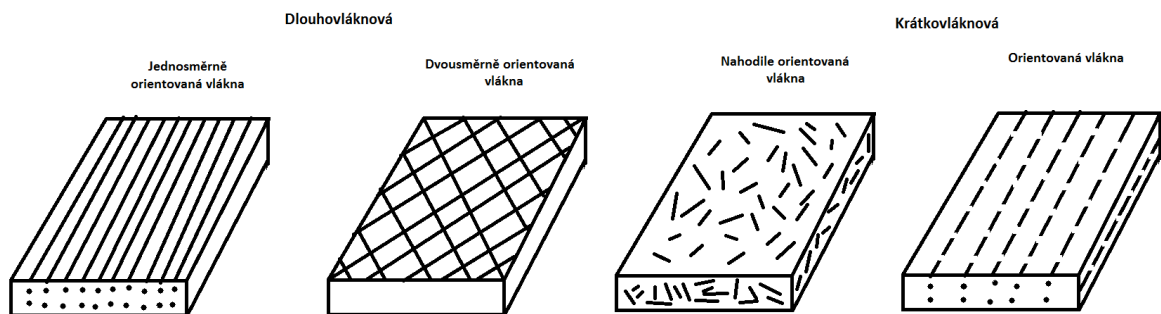
Zlepšení tvarové stálosti a zvýšení tuhosti se dosahuje použitím anorganických částic. Houževnatost v kompozitu zlepšují elastomerní částice. Částice sulfidu a grafitu navyšují odolnost proti otěru a zvyšují kluzné vlastnosti. [4, 9]

- **Vláknové výztuže**

Vláknové výztuže mají v jednom směru výrazně větší rozměr než ve dvou dalších směrech. Jak bylo zmíněno v textu výše, vzhledem k jejich délce se dělí na kompozity s dlouhými vlákny a kompozity s krátkými vlákny (Obr. 9). V matici jsou uspořádány buďto náhodně nebo s přednostní orientací. U kompozitů s krátkými vlákny je velikost vláken významně menší oproti výsledné velikosti výrobku, naopak u kompozitů s dlouhými vlákny je délka vyztužujících vláken zcela srovnatelná s velikostí výrobku. [4, 11, 19]

Vlákna výztuže mají největší vliv a rozhodují o tvarové, tahové a ohybové pevnosti kompozitu. Zmíněné vlastnosti nejvíce ovlivňuje materiál vláken, jejich orientace a také množství obsažené v matici. Pevnost a tuhost, odolnost proti únavě, vlhkosti a teplotě lze

optimalizovat orientací vláken. Nejvyšší vykazující pevnost je ve směru vláken a o mnoho horší pevnost je dosažena ve směrech mimo orientaci vláken. [9, 11]



Obr. 9 Typy vláknových výztuží [12]

1.3.3 Forma výztuže

Formou výztuže se rozumí podoba, ve které se nachází vyztužující prvek kompozitu. Forma výztuže může být například ve formě vláken, rohoží, rovingu, tkanin, úpletů, atd. [11]

- **Roving**

Jde o pramenec rovnoběžných a nestočených vláken, který má v podélném směru vysokou tuhost a velkou pevnost, za to v příčném směru má tyto vlastnosti daleko horší. Slouží pro výrobu profilů tažením, pro navíjení a pro výrobu prepregů. Dodává se na válcových cívkách s vnitřním nebo vnějším odtahem (Obr. 10). Pro výrobu tkanin jsou rovingy dodávány na menších, kónických cívkách jemnosti kolem 3k (číslo nám udává kolik tisícovek elementárních vláken je v rovingu). [11, 20]



Obr. 10 Ukázka roving z uhlíkových vláken [21]

- **Rohože**

Rohože představují plošný polotovár (netkané textilie, rouna), který slouží pro výrobu kompozitních materiálů. Jsou tvořeny v rovině nahodile ležícími uspořádanými

kontinuálními vlákny nebo sekanými prameny větší délky (cca 25 - 50 mm). Tyto sekaná vlákna jsou v rohoži spojena polymerními pojivy. Jsou-li k výrobě použita kontinuální vlákna, není potřeba k udržení jejich vzájemné polohy pojivo, vlákna jsou totiž vzájemně propletena. Velmi podobně jako tkaniny jsou i rohože charakterizovány gramáží. [11, 13]

V průmyslové praxi existují práškově pojené rohože, které jsou tužší a používají se na jednodušší velkoplošné dílce nebo ve spojení s izoftalovými polyestery nebo vinylestery na výrobky odolné proti působení vody a chemikáliím. Speciálním typem jsou rohože z nekonečných vláken s náhodnou orientací, emulzně pojené, které si zachovávají stabilitu i při tlakovém prosyrování pryskyřicí technologií RTM. [20]

V následujícím obrázku (Obr. 11) je vyobrazena rohože ze skleněných vláken.



Obr. 11 Rohože ze skleněných vláken [22]

- **Tkaniny**

Tkaniny představují soubor pramenců nebo vláken, které jsou uloženy v plošné formě pod pravým úhlem. Tímto způsobem zhotovená tkanina je vyztužená ve dvou směrech. Při zvýšení počtu vláken v osnově vznikají různé typy křížení vláken, které se nazývají vazby. Uložená vlákna o různých hmotnostech se mohou nezávisle na sobě měnit a tím vytvářet další typy. Existují tři základní druhy vazeb a to jsou plátňová, keprová a atlasová (Obr. 12). [13]

Plátňová vazba- jedná se o nejpevnější, ale i o nejméně poddajnou vazbu při tvarování, prameny však musí být v osnově i útku stejně silné a také stejnoměrně vzdálené. Aby byla vyvážená plátňová vazba, musí pramenec útku procházet vždy pod a nad každým pramenem

osnovy. Je-li potřeba dosáhnout volnější a tím pádem i poddajnější plátňovou vazbu, musí vytvářet dva a více pramenů útku, které prochází pod dvěma nebo více nitěmi osnovy. Je vhodná pro jednoduché zpracování, jelikož může docházet ke zvlnění. Vyznačuje se velmi velkou rozměrovou stálostí a také se za velkou výhodu považuje malý vznikající otřep při řezání. [11, 13]

Keprová vazba- zvlnění je zde v daleko menší míře než u vazby plátňové, z toho důvodu je zde zaručena vyšší tuhost i pevnost laminátu. V důsledku uspořádání vláken v této vazbě je zde lepší ohebnost a s tím spojená možnost výroby tvarově složitějších materiálů. Keprová vazba je vytvořena, když útek překříží minimálně 2 prameny osnovy, než opět projde pod jedním nebo více prameny osnovy. V další řadě se útek posouvá doprava nebo doleva vždy k nejbližšímu prameni osnovy. [11, 13]

Atlasová vazba- je zde daleko menší vychýlení vláken než u vazby keprové. Tato vazba je vhodná především pro prostorově složité prvky a výhodou je zde také vznik hladkého povrchu, který je vhodný především pro pohledové výrobky. [11, 13]



Obr. 12 Používané typy vazeb [20]

1.3.4 Materiálové typy vláken

- Skleněná vlákna

Skleněná vlákna mají amorfní strukturu, díky čemuž se předpokládá, že v podélném i příčném směru budou vlastnosti shodné. Textilní skleněná vlákna (z angl. Glass Fiber) je společný název pro tenká vlákna (\varnothing 3,5 až 24 μm) s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny. [13, 19]

V následujícím obrázku (Obr. 13) jsou vyobrazeny skleněná vlákna.



Obr. 13 Skleněná vlákna [23]

Nejběžněji se skleněná vlákna vyrábějí z tzv. E-skla (borosilikátové sklo, využívá se nejčastěji v elektrotechnice), toto sklo má nízkou korozní odolnost proti vodným roztokům kyselin a zásad a taky se vyznačuje absorpcí vody. [13, 19]

Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny (S-vlákna) se využívají pro náročnější mechanické namáhané díly. Vyznačují se především lepší teplotní a korozní odolností, stejně tak jako menší hustotou, větším modulem pružnosti i pevností. Využití nalézají jako izolace proti chemickým vlivům nebo proti žáru a to hlavně ve formě rohoží. Další využití je například v letectví či dopravě obecně a to ve formě tkanin. [13, 19]

Tab. 2 Vlastnosti jednotlivých druhů skel [5]

Sklo	E	S	D	C	L
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2540	2490	2160	2490	4300
Pevnost v tahu [GPa]	3,5	4,65	2,45	2,8	1,68
Modul pružnosti v tahu [GPa]	73,5	86,8	52,5	70,0	51,1
Poměrné prodloužení do mezi pevnosti [%]	4,8	5,4	4,7	-	-
Dielektrická konstanta 20°C, 10 ⁶ Hz	5,8	4,53	3,56	6,24	9,49

- **Uhlíková vlákna**

Uhlíková vlákna mají krystalickou strukturu. Tato vlákna vykazují vysokou pevnost, modul pružnosti a tepelnou odolnost a také vysokou únavovou pevnost zároveň s nízkou měrnou hmotností. Uhlíková, někdy také nazývaná jako karbonová vlákna se skládají z více než 90% uhlíku, kdy dalšími prvky jsou vodík, dusík, kyslík. Jedna z výhod těchto vláken je rovněž elektrická vodivost, naopak nevýhodou je nízká odolnost proti nárazu, která je způsobená křehkostí vlákna, během zpracování se tedy lehce lámou. Jako uhlíkové vlákno se označuje dlouhý, tenký pramen o průměru 5–8 μm , který je složený hlavně z atomů uhlíku a tyto atomy jsou spojeny v mikroskopické krystaly s většinou orientací paralelně k dlouhé ose vlákna. Jejich využití je v současné době téměř ve všech oblastech průmyslu. [8, 9, 11, 13]

V následujícím obrázku (Obr. 14) je vyobrazena tkanina složená z uhlíkových vláken.



Obr. 14 Uhlíková vlákna [24]

Uhlíková vlákna jsou vyráběna řízenou pyrolýzou z prekurzorů, což je surovina, která se využívá k výrobě uhlíkových vláken. Převážně se vyrábí z polyakrylonitrilových vláken (PAN). Vzhledem k teplotě zpracování se dají získat rozdílné typy vláken, které mají odlišnou pevnost v tahu. Pevnost v tahu je vyšší, čím nižší se použije teplota zpracování. Vlákna, která se zpracují při teplotě 900°C až po 1500°C jsou tedy pevnější a jsou to vlákna vysokopevnostní (HS). Dále se dají získat vysokomodulová grafitová vlákna (HM) a to další karbonizací vysokopevnostních vláken při teplotách zpracování přibližně kolem 2000°C až po 2800°C. Tyto HM vlákna jsou charakterizovány nižší tahovou pevností, ale za to se vyznačují vyšším modulem pružnosti v tahu. [8, 9, 11, 13]

Tab. 3 Základní mechanické vlastnosti uhlíkových vláken [25]

Typ vlákna	HS- uhlík	HM- uhlík
Modul pružnosti v podélném směru E_{fL} [MPa]	230 000	390 000
Modul pružnosti v příčném směru E_{fT} [MPa]	15 000	6 000
Modul pružnosti ve smyku G_{fLT} [MPa]	50 000	20 000
Pevnost v tahu σ_{fL} [MPa]	5 000	3 800
Hustota ρ [kg/m ³]	1 600	1 700

- **Přírodní vlákna**

Do této skupiny vláken patří ty typy, které jsou z obnovitelných zdrojů, zejména pak ty na bázi celulózy- např. konopí, bavlna, sisal (Obr. 15), juta, len, ale i mnoho dalších. Uplatnění nalézají zejména jako levnější alternativa skleněných vláken. V poslední době se využívají stále více k výrobě pro pevnostně méně náročné a zároveň taky pro lehké dílce v interiérech automobilů a jiných dopravních prostředcích. Při použití rostlinných vláken je jedna z největších výhod úspora polymeru a recyklace odpadu, dále mají přírodní vzhled povrchu a také je možný rychlejší výrobní postup vzhledem k větší tepelné vodivosti. Obvykle se používají ve formě pramenců a nití, netkaných materiálů- rohoží nebo tkanin. [11, 13]

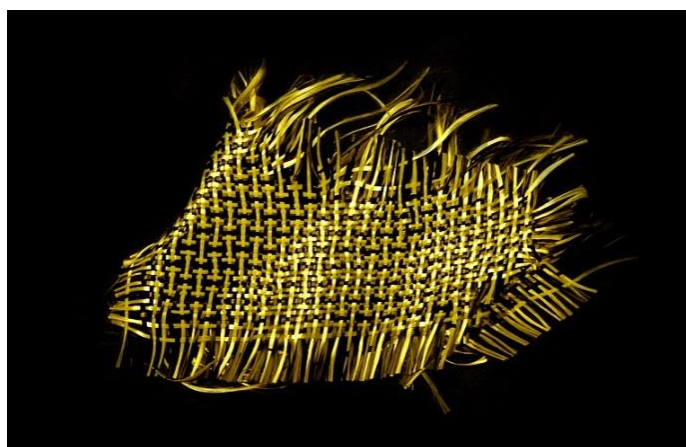
Hlavními výhodami přírodních vláken jsou nízká hustota, malá abraze při mechanickém opracování, bio-rozložitelnost, naopak mezi nevýhody patří omezená délka vláken, navlhavost (nutnost fyzikální či chemické modifikace), závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu a taky možnost změn vyvolaných biologickým napadením. [13]



Obr. 15 ukázka sisalového vlákna [26]

- **Aramidová (kevlarová) vlákna**

Aramidová vlákna patří do skupiny na bázi lineárních organických polymerů, kdy se jejich kovalentní vazby orientují podle osy vlákna. Tato vlákna se vyznačují vysokou pevností, tuhostí, rezistencí proti většině anorganických i organických rozpouštědel, ohnivzdorností a také tím, že jsou hydrofilní, to znamená, že absorbují vlhkost. Vlákna mají rozsáhlé využití při zvyšování pevnosti kompozitních materiálů, kde se často kombinují s uhlíkovými a křemíkovými vlákny (Obr. 16). Používají se pro protipožární obleky, dále se taky využívají ve vojenském průmyslu jako neprůstřelné vesty. Jedná se o nejlehčí vyztužující vlákno ze všech komerčně používaných vláken. [8, 13, 19, 27]



Obr. 16 Carbon- kevlarová tkanina [28]

Aramidová vlákna se mohou bez problémů zpracovávat všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Vyrábějí se v několika druzích, které se od sebe liší svými mechanickými vlastnostmi (Tab. 4). Existují tři základní druhy kevlaru: kevlar, kevlar 29 a kevlar 49. Kevlar se používá pro vyztužení různých gumových předmětů (např. pneumatik); kevlar 29 má uplatnění v průmyslu (kabely), na brzdových obloženích a na nejrůznějších chráničích (od sportovních po vojenské balistické vesty); a bytelnější kevlar 49 slouží pro zesílení trupů lodí, letadel, atd. [13, 27]

Tab. 4 Mechanické vlastnosti aramidových vláken [13]

Typ aramidového vlákna	Vysokotažný (Kevlar)	S vysokou tuhostí (Kevlar 29)	Ultratučný (Kevlar 49)
Hustota [kg/m^3]	1450	1450	1450
Průměr [μm]	12	12	12
Modul pružnosti v tahu [MPa]	80 000	131 000	185 000
Mez pevnosti v tahu [MPa]	3 600	3 800	3 400
Tažnost [%]	4,0	2,8	2,0

- **Čedičová vlákna**

Jedná se o vlákna, která se svými vlastnostmi podobají skleněným vláknům typu S. Čedičová vlákna mají nízkou tažnost, avšak vysokou pevnost, jsou také nehořlavá, nenasákavá a mají vysoký elektrický odpor a nízkou tepelnou vodivost. Jako hlavní výhoda oproti skleněným S vláknům je, že jsou asi o 40% levnější. Mezi negativní vlastnosti se řadí jejich křehkost. Výroba těchto vláken je velmi podobná jako výroba u vláken skleněných. Uplatnění nachází hlavně ve stavebnictví a to v podobě tepelně a zvukově izolačních desek, podlah, stropů, příček a také v dalších technických výrobcích jako brzdové destičky, lamináty a rozbrušovací kotouče. [11, 13, 20]

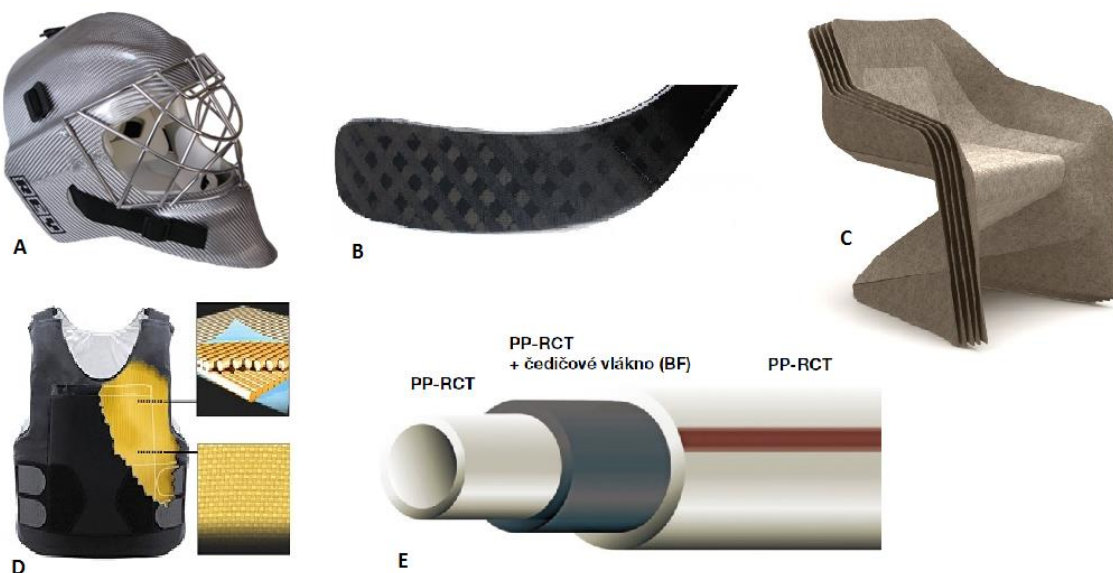
- **Kovová vlákna**

Kovová vlákna se vyrábí z ušlechtilého materiálu, například jde o korozi-vzdorné a žáruvzdorné oceli a slitiny na bázi niklu. Jejich použití je ve formě vodivých tkanin a to jako filtrační média pro agresivní látky a vysoké teploty, tepelné štíty a také k plnění elektricky vodivých plastů a kompozitů. [15, 19]

- **Keramická vlákna**

Keramická vlákna mají oproti uhlíkovým nebo polymerním vláknům větší hustotu, ale za jejich hlavní výhodu se považuje výborná tepelná a chemická odolnost. Tyto vlákna jsou relativně levná a to z důvodu, že je jejich výchozí surovina dostupná ve větším množství. Keramická vlákna rozdělujeme na oxidová a neoxidová. Pro výrobu vláken se běžně používají SiC, Al₂O₃, ZrO₂. Jsou využívána především v kombinaci s uhlíkovými, kovovými nebo keramickými matricemi. Uplatnění nacházejí v leteckém průmyslu a také u výrobků, které pracují za vysokých teplot. [8, 11]

V následujícím obrázku (Obr. 17) jsou vyobrazeny ukázky produktů z již zmíněných druhů vláken.



Obr. 17 Ukázka některých výrobků z různých vláken. A- brankařská maska ze skleněných vláken, B- hokejová hůl z uhlíkových vláken, C- elegantní židle z vláken konopí, D- kevlarová balistická vesta, E- tři vrstvá trubka s čedičovým vláknem [29, 30, 31, 32, 33]

2 TECHNOLOGIE PRO VÝROBU VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

Důležitou roli, vzhledem k výsledku, kterého chceme dosáhnout, hraje správný výběr technologie na výrobu kompozitů. Existuje mnoho technologií na výrobu kompozitů. Pro jakou technologii se rozhodneme, se určuje i podle ekonomiky výroby, kdy je potřeba pro některé postupy větší počáteční investice, z toho důvodu se nehodí pro malosériové výroby. [4, 13]

Jednotlivé technologie lze třídit na základě těchto kritérií:

- a) Typ formy - uzavřená, otevřená
- b) Sériovost - malosériové, velkosériové
- c) Rozměry - malé, velké
- d) Kvalita
- e) Výsledné vlastnosti

Základními metodami výroby jsou:

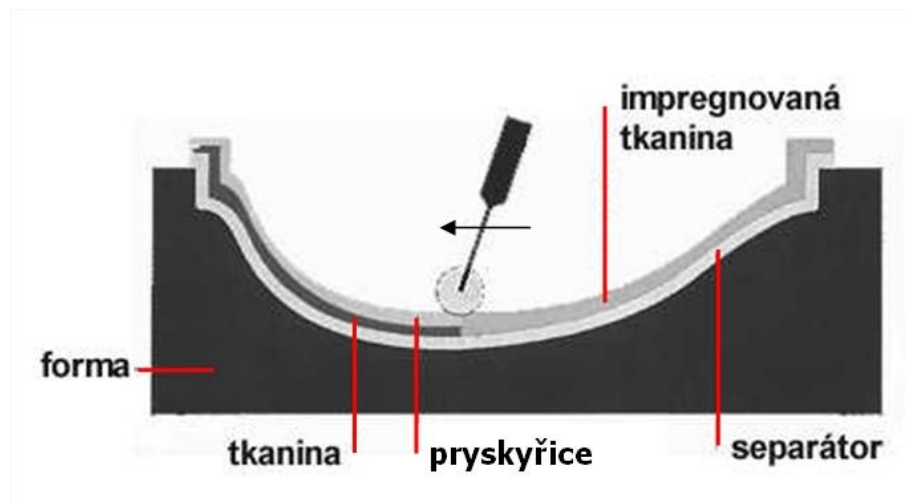
- 1) Ruční laminování
- 2) Vakuová infuze
- 3) Vytvrzování v autoklávu / v peci
- 4) Stříkání
- 5) Vysokotlaké vstřikování – RTM
- 6) Vysokotlaké vstřikování pomocí vakua – VARTM
- 7) Resin film infusion – RFI

2.1 Ruční laminování

Jedná se o technologii, kdy je pryskyřice i výztuž nanášena na vhodný povrch pozitivní nebo negativní formy ručně (Obr. 18). Kvalita povrchu vytvrzeného kompozitního dílce závisí na povrchu, na který jsou komponenty nanášeny. Touto technologií dosáhneme kvalitního povrchu pouze na jedné straně výrobku, což je jedna z jejich výhod. Po položení výztuže a prosycení pryskyřicí je připravený kompozit ponechán a vytvrzován, nejčastěji při pokojové teplotě. [9, 13, 34]

Tato technologie je poměrně rozšířená a nejčastěji se používá při výrobě prototypů, malých sérií, nebo velkoplošných dílců. Hlavními výhodami je jednoduchost a nízké náklady na výrobu formy. Kvalita koncového výrobku silně závisí na schopnostech a zkušenostech

pracovníka, který jej vyrábí. Uplatnění této technologie je především u obkladů karoserií dopravních prostředků (autobusy, vlaky) a v lodním průmyslu. [9, 13, 34]



Obr. 18 Ruční kladení polymerního kompozitu [35]

Výztuže ve formě tkanin, nebo rohoží jsou kladeny ručně do výrobní formy, která je otevřená, a kde se postupně prosycuje pryskyřicí v tekutém stavu pomocí ručního nářadí (nejčastěji válce a štětce). Je velice nutné zamezit vzniku vzduchových mezer, které zhoršují výsledné vlastnosti, ale takřka není možné dosáhnout úplného odvdoušnění. Jednotlivé vrstvy je možné překrýt pružnou fólií a za účinku podtlaku stlačit jednotlivé vrstvy, čímž dojde ke zvýšení kvality samotného kompozitu. Pryskyřice se vytvrzují při standardních atmosférických podmínkách a pokojové teplotě. Případně se dotvrzují při teplotách kolem 80°C. Jako pojivo se zde používají nejčastěji polyesterové, epoxidové, vinylesterové a fenolické pryskyřice. Výztuže nejčastěji představují sklo, čedič, kevlar, uhlík a přírodní vlákna (juta, konopí). [13, 34, 36]

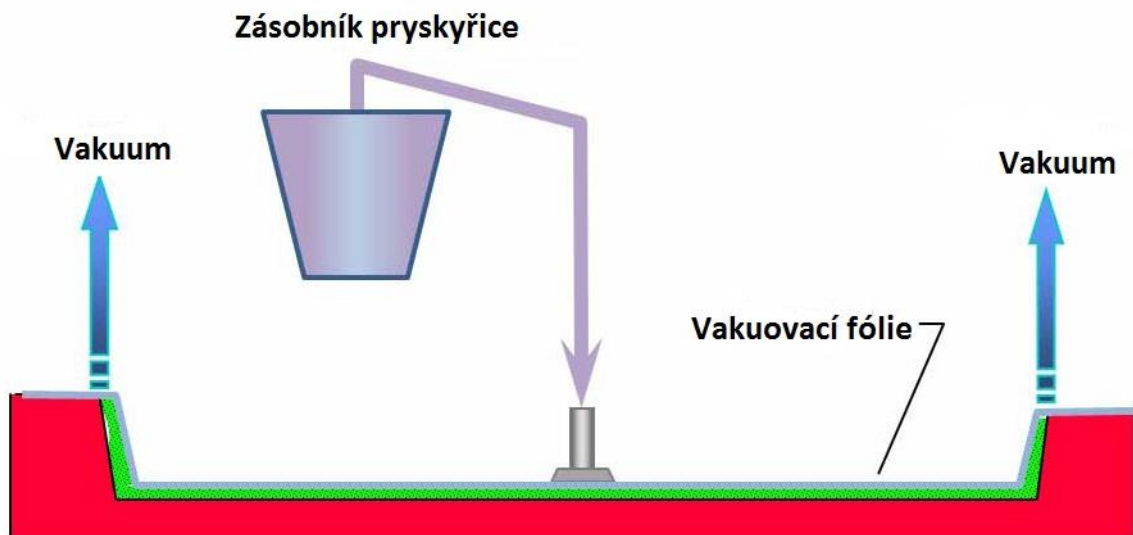
2.2 Vakuová infuze

Tato technologie využívá podtlaku k prosycování pryskyřice přes suché výztuže, které jsou nejčastěji ve formě rohoží, nebo tkanin na bázi skelných, uhlíkových, nebo aramidových vláken a to v různém stylu tkaní s různou orientací a gramáží. Suché výztuže se postupně kladou do připravené dutiny formy. Na tuto výztuž se dále kladou technologické, respektive pomocné materiály, jako jsou odtrhová tkanina, separační fólie, rozváděcí tkanina, vakuová fólie, atd. Za pomoci vakuové fólie se všechny materiály ve formě stlačí (Obr. 19). Důležitou složkou je odsátí veškerého vzduchu ještě před přívodem pryskyřice. Pryskyřice je následně do formy dopravována pomocí vakua a rozváděcí tkaniny. K prosycení suchých vrstev

výztuže se využívá podtlaku a suchá výztuž se postupně smáčí a prosycuje pryskyřicí. Matrice se následně vytvrzuje při standardních atmosférických podmínkách, kdy nejčastěji se využívají polyesterové i epoxidové nízko-viskózní pryskyřice. [9, 34, 36, 37]

Mezi výhody se řadí vysoká kvalita, výroba velkoplošných výrobků, nižší hmotnost, vyšší obsah výztuže oproti standardnímu ručnímu laminování a vysoká pevnost výrobků. Naopak za nevýhodu se považuje složitý proces, podpůrné materiály pro technologii, které se stávají odpadem a nutnost zajištění proškolení pracovníků. [9, 34, 36, 37]

Tato technologie se nejčastěji používá tam, kde by ostatní technologie byly hodně nákladné, nebo příliš pracné. Vakuová infuze se využívá například při výrobě palub a trupů lodí, dále pro různé dílce u lokomotiv, vlaků a tramvají (obkladové panely v interiéru i exteriéru, přední čela, nárazníky), na lopatky větrných elektráren a také různé komponenty letadel. [9, 34, 36, 37]



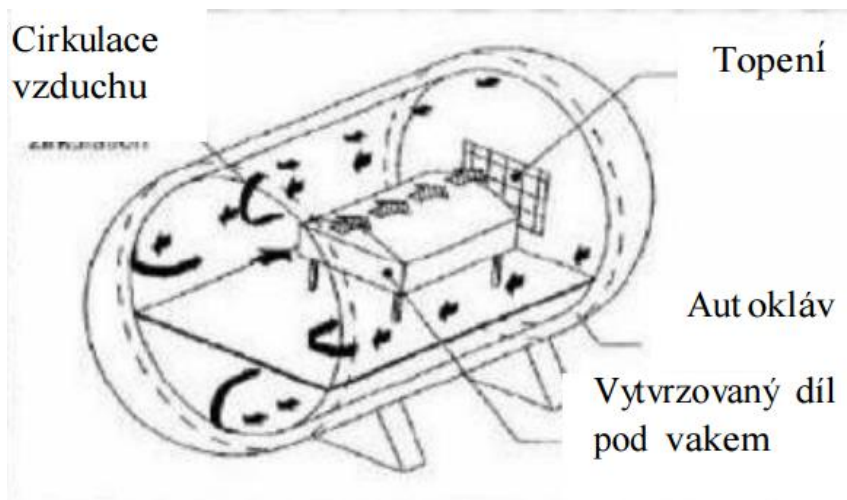
Obr. 19 Vakuové prosycování [38]

2.3 Vytvrzování v autoklávu / v peci

- Vytvrzování v autoklávu

Jedná se o technologii, která spojuje tlakové lisování a lisování pomocí vakuového vaku. Jde tedy o vytvrzení kompozitu pomocí tepla a tlaku v uzavřené nádobě (autoklávu) s přesně říditelnými parametry vytvrzování (Obr. 20). Výhodami je další zvýšení obsahu výztuží, kdy mohou být použita jádra například na odlehčení kompozitů, dále mohou být v jednom kroku zabudovány další součásti, kdy najednou může být vytvrzeno mnoho částí v jednom autoklávu. Nevýhodami je vysoká cena autoklávů a skutečnost, že umožňuje pouze

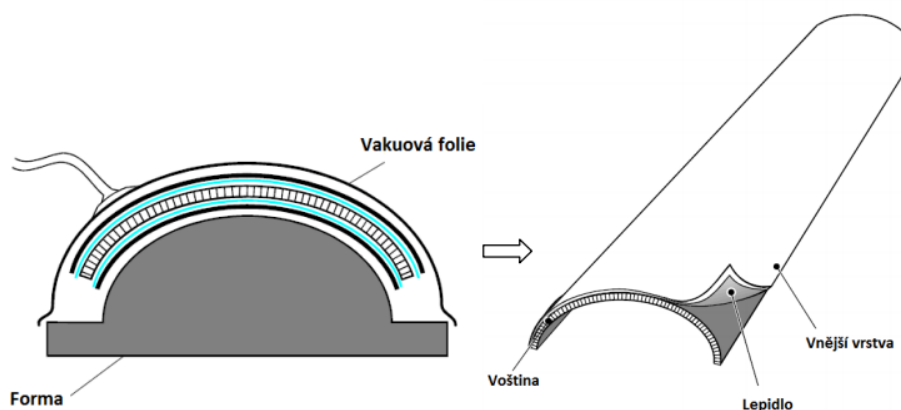
malosériovou výrobu, metoda je velmi pracná a velikost vyráběných dílů je omezena velikostí autoklávu. Tímto procesem se vyrábí velmi kvalitní výrobky a ty se uplatňují především v letectví a kosmonautice. [4, 11, 13]



Obr. 20 Autokláv [13]

- **Vytvrzování v peci**

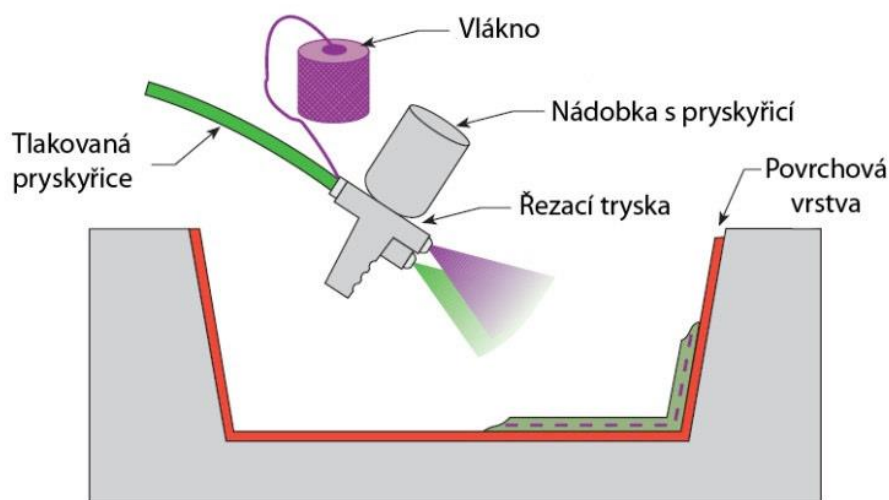
Vzhledem k tomu, že vytvrzování v autoklávu je energeticky i časově náročné, tak se objevuje snaha alespoň částečně tuto nákladnou výrobu nahradit jinými způsoby. Jedním ze způsobů, na který se klade čím dál větší pozornost, je vytvrzování v peci (Obr. 21). Rozdíl oproti vytvrzování v autoklávu je, že zde nepůsobí tlak, ale nýbrž jen teplota a podtlak. Tato technologie výroby je vhodná zejména pro sendvičové materiály s vnějšími vrstvami z prepregu nebo kovových desek a vnitřní vrstvy z pěny nebo voštinového jádra. [39]



Obr. 21 Schéma vytvrzování v peci a výsledný výrobek [39]

2.4 Stříkání

Jedná se o metodu, která vznikla modifikací technologií ručního laminování, kdy se na povrch formy nanáší katalyzovaná směs krátkých skelných vláken současně s matricí, která je následně stlačena a vytvrzena (Obr. 22). Na nanášení se používá speciální stříkací pistole, buď ručně, nebo je také možné tuto technologii automatizovat pomocí robotů a manipulátorů. Technologie se využívá především pro sériovou výrobu středních a velkých dílů s jednoduchým tvarem. [4, 13, 36]



Obr. 22 Schéma stříkání [40]

Mezi výhodné vlastnosti této metody patří nízké náklady na technologické zařízení a poměrně dobrá produktivita a reprodukovatelnost výrobků, je-li proces automatizován. U této technologie je velká šířka použitelnosti, kdy není žádné omezení velikosti výrobku. Mezi nevýhody se řadí vysoká hmotnost, kdy je použito příliš velké množství pryskyřice a také vyšší koncentrace styrenu, který je škodlivý. Aplikace je například ve výrobě panelů, lodí, zásobníků, van a nádrží. [4, 11, 13, 36]

2.5 Vysokotlaké vstřikování

Vysokotlaké vstřikování, neboli RTM (z angl. Resin Transfer Molding) se zabývá výrobou kompozitů složených z pryskyřicové matrice a soustavy vláken, kde vlákna mohou být rozličně uspořádána. RTM lze rozdělit na dvě fáze. V první fázi se vyrobí vláknový předlisk. V druhé fázi dojde k zastříknutí předlisku pryskyřicí, jež se umístil do formy. Tvarový předlisk vzniká buď přímo pomocí některé textilní technologie, nebo je vyroben tvarováním rovinného textilního přístřihu. Tato metoda patří do skupiny metod pracujících

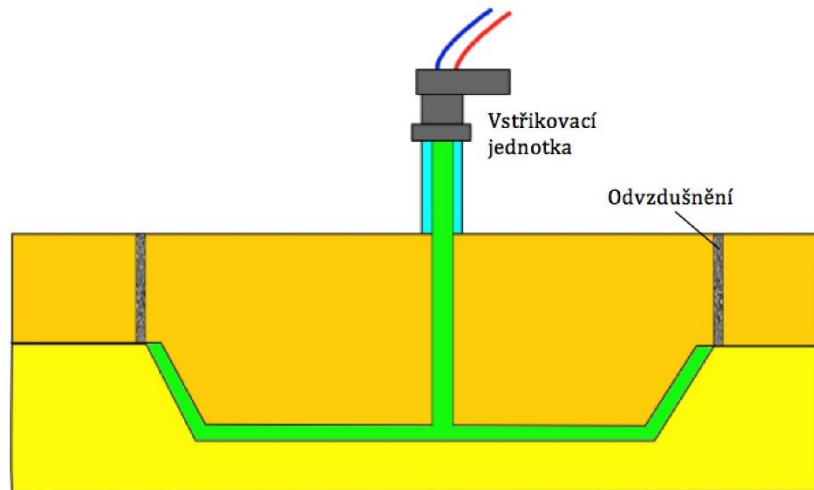
s uzavřenou formou (Obr. 23). Forma ať již kovová nebo laminátová se skládá z horního a spodního dílu, na které se případně nanáší gelcoat. Výhodou RTM metody je, že je možno vyrobit kompozitní díly, které mají po obou stranách dobrý povrch, přičemž například barva může být na každé straně jiná. Metoda RTM se uplatňuje jak v kusové výrobě, tak i v sériové výrobě. Kompozitní dílce vyrobené touto technologií se využívají především v letectví, automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, ve strojírenství, při výrobě lodí, jízdních kol, atd. [11, 41]

Tab. 5 Výrobní postup jednotlivých operací RTM technologie [41]

1.	Dutina otevřené formy se opatří dělicí látkou, pro zamezení přilnavosti pryskyřice ke stěnám dutiny formy.
2.	Do dutiny formy se vloží předlisek (předliskem se míní suchá vlákna uspořádaná do požadované struktury či mohou být opatřena pojivem).
3.	Forma se uzavře a uzamkne.
4.	Do dutiny se pod tlakem vstříkne směs pryskyřice s vytvrzovacím činidlem (někdy lze místo vytvrzovacího činidla užít ohřev vstříknuté pryskyřice, nesmí se však teplem poškodit výztuž)
5.	Vytvrzování pryskyřice.
6.	Otevření formy.
7.	Vyjmutí výrobku.
8.	Vyčistění dutiny formy.
9.	Kontrola výrobku a případné konečné úpravy výrobku.

Tlak pryskyřice je obecně nízký cca 0,3 MPa. Záleží na struktuře předlisku, jeho tloušťce, velikosti a tvaru výrobku, druhu pryskyřice atd. Po uzavření formy a vstříknutí pryskyřice, se pryskyřice pohybuje skrz výztuž resp. předlisek umístěný v dutině formy. Vzduch, který je uvnitř dutiny, je vytlačován postupujícím čelem pryskyřice. Aby mohl vzduch uniknout, jsou ve formě od vzdušňovací ventily, které jsou umístěny v nejvyšších bodech dutiny formy nebo v prostorách dutiny, které jsou plněny jako poslední. Když je dutina zcela vyplněna pryskyřicí, jsou ventily a vtoky pryskyřice uzavřeny. Po vytvrzení, které probíhá při teplotě

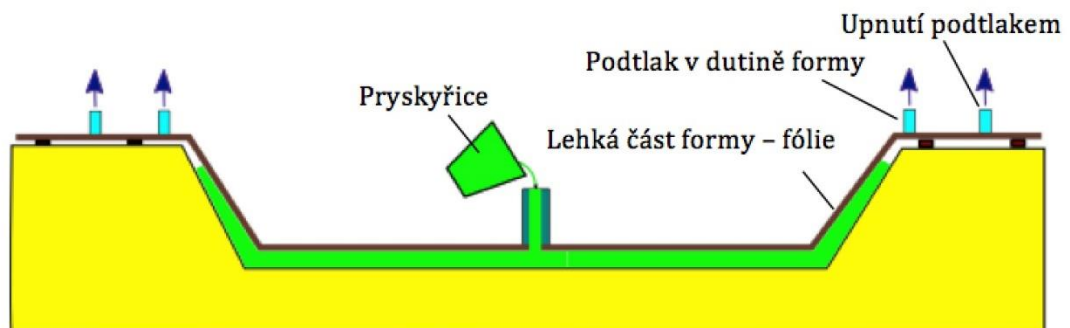
okolí za pomoci tvrdidla nebo pomocí ohřevu, je výrobek po otevření formy z dutiny formy vyjmut. [3, 11]



Obr. 23 Princip metody RTM [41]

2.6 Vysokotlaké vstřikování pomocí vakua- VARTM

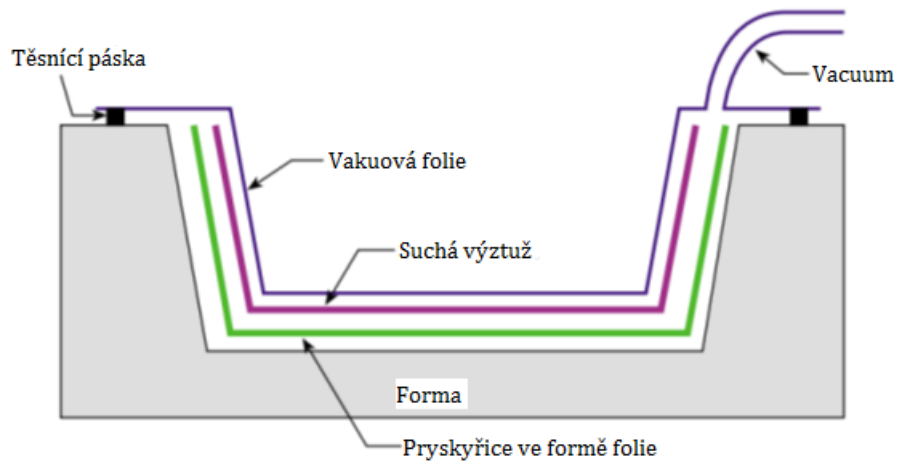
Modifikací technologie RTM je VARTM (z angl. Vacuum Assisted RTM)), neboli L-RTM (z angl. Light Resin Transfer Molding). Jedná se o výrobní postup, kdy je jedna polovina formy nahrazena fólií a funkci vstřikovacího tlaku přebírá atmosférický tlak (Obr. 24). Nutností pro průběh procesu je vytvoření podtlaku v dutině formy odsávacími ventily na okrajích výrobku. [36, 41]



Obr. 24 Princip technologie L-RTM [41]

2.7 Resin film infusion- RFI

Jedná se o proces, kdy jsou suché vrstvy výztuže prokládány vrstvami filmu pryskyřice o značné viskozitě (Obr. 25). Ohřevem na teplotu vytvrzování a odčerpáním vzduchu z prostoru pod fólií nastane roztavení filmu pryskyřice a jeho prosycení do suchých míst výztuže. Za hlavní výhody se považuje zkrácení doby cyklu, lepší kvalita výrobku a nižší cena. [3, 11,]



Obr. 25 Schéma RFI- Resin film infusion [3]

3 EXPERIMENTÁLNÍ VYŠETŘOVÁNÍ KOMPOZITŮ

Experimentální vyšetřování znamená určení materiálových vlastností zkouškou, provedenou na vhodně navržených vzorcích. Údaje získané zkouškou jsou příslušně převedeny ke stanovení různých materiálových vlastností, které mohou být pak použity pro výpočet a návrh skutečných konstrukcí. [42]

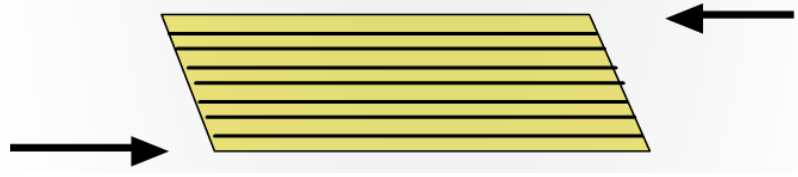
Aby mohly být použity moderní návrhové postupy k účinnému využití materiálu, je třeba porozumět odezvě materiálu v celém rozsahu zatížení. V případě kompozitních materiálů je vhodné začít návrh s hlavními vlastnostmi materiálu a dospět k makromechanickým vlastnostem kompozitu použitím mikromechanických výpočtů. Platnost mikromechanických výpočtů však zajišťuje teprve jejich prověření experimenty. Jiný důvod experimentálního vyšetřování je prověření vhodnosti výrobního postupu, zajištění stejnorodosti materiálu a získání srovnávacího měřítka pro různé materiálové alternativy. [42]

Konstanty pružnosti a pevnosti jsou základní mechanické vlastnosti materiálů. Pro jednosměrovou vrstvu nebo kompozit existují čtyři nezávislé konstanty pružnosti (modul pružnosti v podélném a příčném směru, modul pružnosti ve smyku, hlavní Poissonovo číslo) a pět nezávislých pevností (tahová a tlaková pevnost v podélném a příčném směru a pevnost ve smyku v rovině vrstvy). [42]

V případě laminátu je také důležitou vlastností interlaminární smyková pevnost. Tyto vlastnosti je potřeba zjistit k základnímu popisu jednosměrové vrstvy. Obvykle jsou zjištěny namáháním vhodných vzorků materiálu zatížením působícím v rovině. Protože však jsou konstrukce z kompozitních materiálů často vystaveny ohybovému zatížení, je třeba navíc ke zmíněným vlastnostem určit ještě ohybové vlastnosti. Je žádoucí, aby všechny vlastnosti byly určovány pro jednotlivou vrstvu kompozitního materiálu, tj. pro základní stavební prvek kompozitní struktury. [42]

3.1 Smyk

Při tomto druhu namáhání se snaží sousední vrstvy klouzat jedna po druhé. Pryskyřice zastává hlavní funkci a to takovou, že 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. [40]



Obr. 26 Smykové napětí aplikované na kompozitní materiál [40]

Smykové napětí v rovině τ_{12} , vyjádřené v MPa, se vypočítá podle následující rovnice:

$$\tau_{12} = \frac{F}{2bh} \quad (1)$$

kde F je okamžitá síla, v N ;

b šířka zkušebního tělesa, v mm ;

h tloušťka zkušebního tělesa, v mm .

Smyková pevnost v rovině τ_{12M} , vyjádřená v MPa, se vypočítá podle následující rovnice:

$$\tau_{12M} = \frac{F_m}{2bh} \quad (2)$$

kde F_m je síla při porušení tělesa, v N .

Smyková deformace γ_{12} se vypočítá podle následující rovnice:

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (3)$$

kde ε_x je deformace ve směru rovnoběžném s osou tělesa;

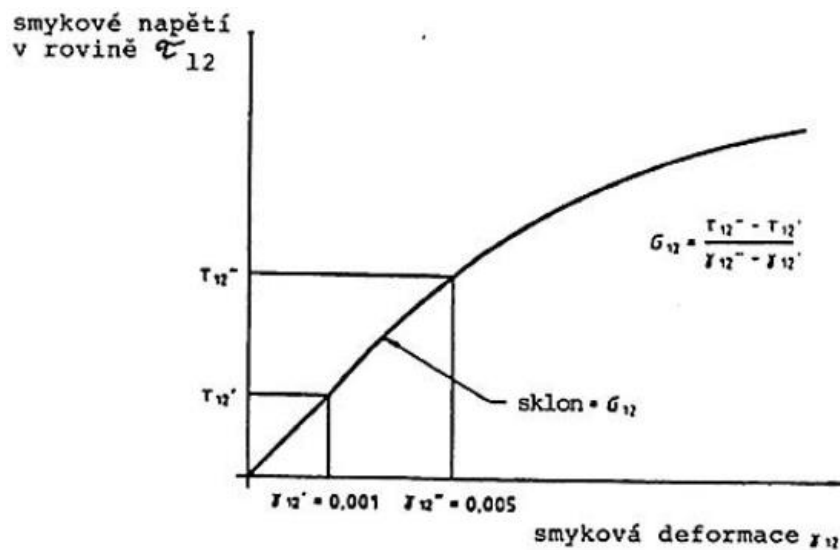
ε_y je deformace ve směru kolmém k ose tělesa.

Smykový modul v rovině G_{12} , vyjádřený v MPa, se vypočítá podle následující rovnice (Obr. 27):

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}'' - \tau_{12}'}{\gamma_{12}'' - \gamma_{12}'} \quad (4)$$

kde τ_{12}' je smykové napětí při smykové deformaci $\gamma_{12}' = 0,001$;

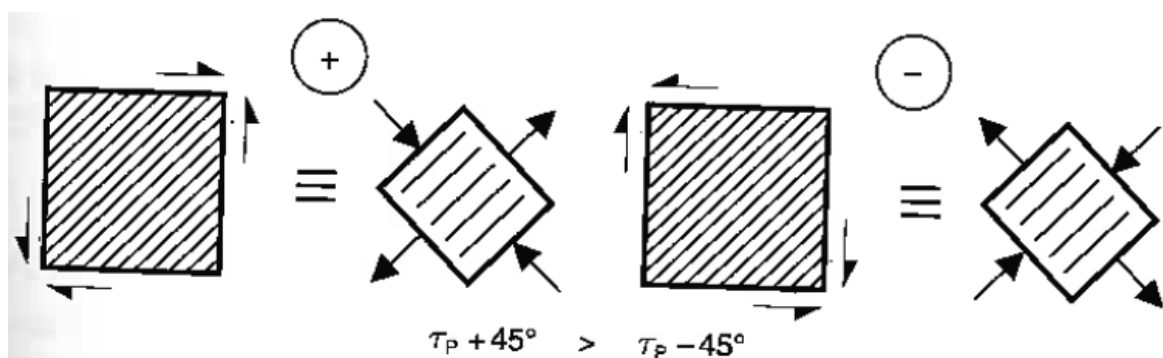
τ_{12}'' je smykové napětí při smykové deformaci $\gamma_{12}'' = 0,005$.



Obr. 27 Diagram smykové napětí/smyková deformace [46]

3.1.1 Závislost pevnosti ve smyku na směru namáhání

Únosnost jednosměrně vyztuženého laminátu při tahu ve směru vláken je mnohem vyšší než ve směru kolmo na vlákna. Při namáhání tlakem je tomu naopak. To způsobuje závislost pevnosti ve smyku na směru namáhání (Obr. 28). Je-li jednosměrný laminát namáhán smykovým napětím působícím ve směru skloněném ke směru vláken o úhel 45° , pak ve směrech rovnoběžném a příčném k vláknům působí jen normálová napětí. Působí-li smyková napětí ve smyslu označeném jako +, pak je příčné namáhání tlakové. Při smyku označeném – je toto napětí tahové. Z toho plyne, že pevnost ve smyku je v druhém případě menší než v prvním. [13]



Obr. 28 Vliv směru smykových napětí na způsob zatížení [13]

3.2 Způsoby testování smyku u kompozitních materiálů

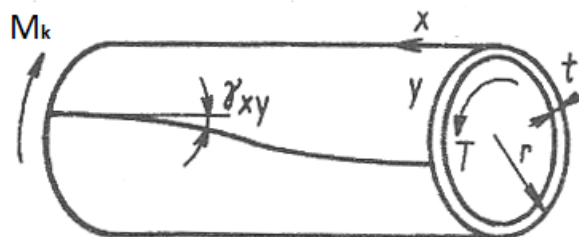
3.2.1 Rovinné zkoušky smykem

Zkoušky, při kterých nastává smykové zkosení pouze v rovině vzorku z kompozitního materiálu, jsou pojmenovány rovinné zkoušky smykem. Vlastnosti, které se mohou určit touto zkouškou je pevnost ve smyku a modul pružnosti ve smyku. Při těchto zkouškách je vzorek materiálu vystaven zatížení, který vyvolá stav napjatosti v čistém smyku, kde se měří vznikající přetvoření. [42]

Nejsnadnější způsob, jak docílit stavu čistého smyku je namáhat tenkostěnnou trubku kruhového průřezu kroucením kolem její osy (Obr. 29). Tak vzniká rovnoměrný smyk na povrchu trubky. Vztah mezi kroučícím momentem M_k a smykovým napětím τ_{xy} je

$$\tau_{xy} = \frac{M_k}{2\pi r^2 t} \quad (5)$$

kde r je střední poloměr a t je tloušťka stěny trubky. [42]

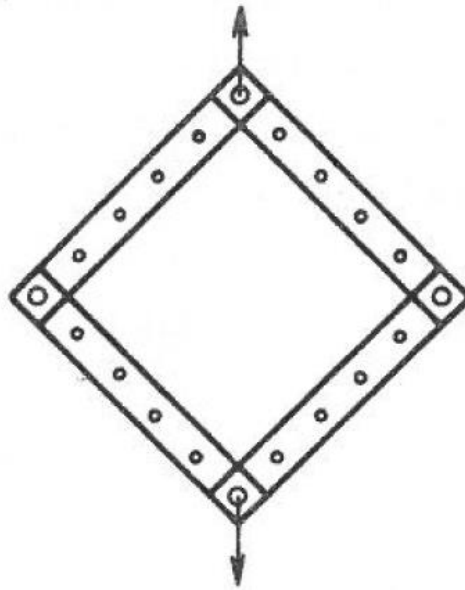


Obr. 29 Zkouška trubky krutem [42]

Při zkoušce musí být splněny dva požadavky a to, aby nedošlo k porušení soudržnosti mezi vzorkem a koncovým uchycením, kterým je přenášen krut a také, aby nedošlo k vybočení vzorku. První se zajistí provedením dlouhého adhezivního spoje připojeného na vnější i vnitřní líc trubky. Vybočení lze zabránit použitím dostatečně tlusté stěny nebo malé délky vzorku. [42]

Místo torzních trubek existují i jiné typy vzorků, které se používají k určení rovinných smykových vlastností. Může to být třeba čtvercová deska zatížená v rozích zatěžovacím přípravkem, který má tvar obrazového rámu (Obr. 30). Zatěžovací přípravek je přišroubován nebo přilepen k okrajům vzorku. Díky tomuto zatížení se vyvolá stav čistého smyku blízko okrajů, ale stav napětí potom ve střední části se značně odchyluje od čistého smyku. Z toho

důvodu může být tato metoda použita jen pro určení pevnosti ve smyku, nikoli modulu pružnosti ve smyku. [42]



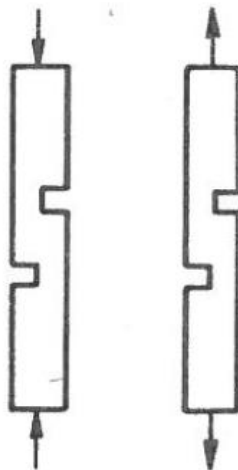
Obr. 30 Zkouška „obrazovým rámem“ ke zjištění rovinných smykových vlastností. [42]

3.2.2 Interlaminární smyková pevnost

Při malém rozpětí podpěr (nosných bodů) vzniká sklon k porušení interlaminárním smykem. Je-li rozpětí dostatečně krátké, tak se porušení iniciuje a rozvíjí porušením interlaminárním smykem a zkouška tedy může být použita k určení interlaminární smykové pevnosti. Ohybová zkouška s krátkým rozpětím je tedy nazývána smyková zkouška na krátkém nosníku, která je nejběžněji používanou zkouškou k určení interlaminární pevnosti ve smyku. Při smykové zkoušce na krátkém nosníku porušení vychází z trhliny běžící podél středové roviny nosníku, tudíž rovina trhliny je rovnoběžná k rovině laminace. Smyková zkouška na krátkém nosníku, ale může být neplatná, pokud před smykovým porušením předchází tahové porušení vláken nebo pokud tahové a smykové porušení nastane současně. [13, 42]

Existuje také další typ zkoušky pro určení interlaminární smykové pevnosti a to zkouška desky s vruby („tloušťkový smyk“). Při této zkoušce jsou provedeny dva vruby ve směru tloušťky z protilehlých stran vzorku a vzorek je zkoušen v tahu nebo v tlaku (Obr. 31). Vzdálenost mezi vruby je volena tak, aby lomové zatížení odpovídající porušení interlaminárním smykem mezi vruby bylo menší než lomové zatížení odpovídající tahovému porušení příčného průřezu zeslabeného vrubem. K určení interlaminární smykové pevnosti

se také používá „kolejnicová“ smyková zkouška. Smyková zkouška na krátkém nosníku je však nejnadhěji proveditelná oproti zkoušce s deskou s vruby nebo smykové zkoušce „kolejnicového“ typu a z toho důvodu se používá nejčastěji. [13, 42]



Obr. 31 Vzorky se dvěma přesazenými vruby pro zkoušku interlaminárního smyku. [42]

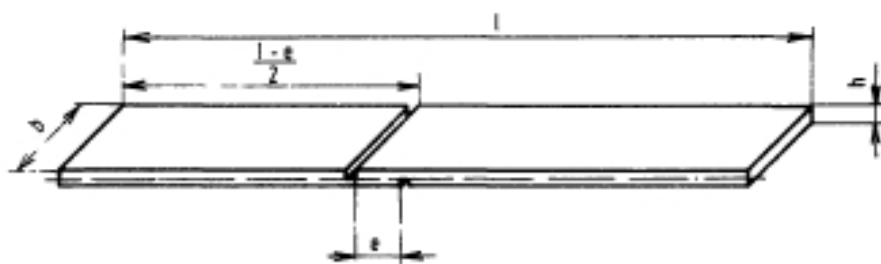
3.3 Normy pro zkoušení smyku u kompozitních materiálů

- ČSN 64 0662- Zkoušení plastů. Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů

Tato norma platí pro stanovení pevnosti ve smyku vyztužených plastů a je použitelná pro všechny typy laminátů s rovinnými rovnoběžně uspořádanými vrstvami výztuže. [43]

Účel a význam zkoušky: Pevnost ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů je důležitá pro kontrolu kvality vyráběného materiálu a při předvídání pevnosti materiálu při zvýšených teplotách. [43]

Podstata zkoušky: Zkušební těleso opatřené zářezy (Obr. 32) je zatěžováno tahovou silou, až dojde ke smykovému porušení mezi vrstvami výztuže. Hodnota zatížení při smykovém porušení tělesa se odečte a použije k výpočtu pevností ve smyku mezi vrstvami. [43]

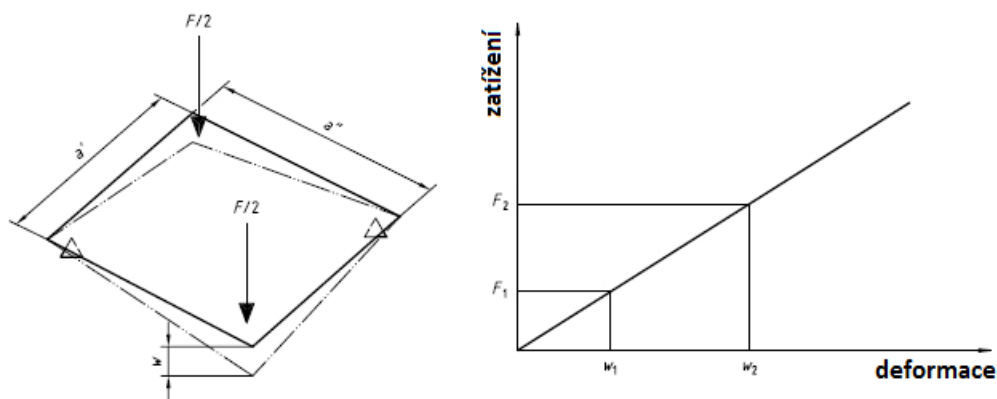


Obr. 32 Zkušební těleso pro ČSN 64 0662. [43]

- **ČSN EN ISO 15 310-** Vlákna vyztužené plastové kompozity: Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky

Účel a význam zkoušky: Z takto získané lineární charakteristiky se stanoví smykový modul pružnosti v GPa. [44]

Podstata zkoušky: Při této zkoušce nedochází k poškození zkušebního tělesa. Těleso, ve tvaru čtvercové desky (Obr. 33) o délce strany 150 mm a tloušťce 2 mm, pro jednosměrná dlouhá vlákna, či tloušťce 4 mm pro zbylé druhy výztuží, je lineárně zatěžováno do poloviny své tloušťky ve dvou protilehlých krajních bodech radiální silou a na zbylých dvou protilehlých krajních bodech je podepřeno. [44]

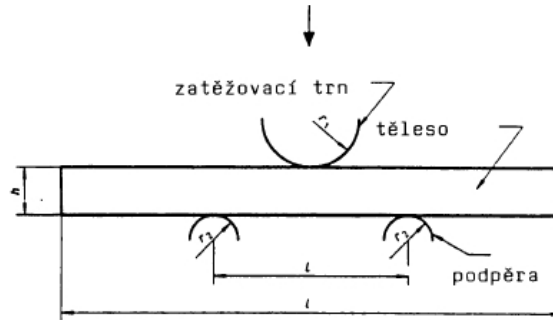


Obr. 33 Znárodnění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 15310. [44]

- **ČSN EN ISO 14 130-** Vlákna vyztužené plastové kompozity - Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku
- **ASTM D 2344-** Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates

Účel a význam zkoušky: Metoda není vhodná pro stanovení konstrukčních parametrů, ale může být použita pro předběžný výběr materiálů nebo pro kontrolu kvality. Při zkouškách plastů vyztužených vysokomodulovými vlákny (např. aramid), nedochází vždy k porušení smykem, často z důvodu špatného zvolení poměru vzdálenost podpěr a délky zkušebního tělesa ku tloušťce, a proto je důležité zaznamenat druh porušení (smyk nebo tah) a místo poruchy (vpravo, vlevo, uvnitř nebo kompletní rozštěpení zkušební vzorku). Jestliže se zkušební těleso poruší jiným způsobem, než vodorovným smykem je třeba zkoušku zopakovat. [45]

Podstata zkoušky: Podstatou této zkoušky je zatížení tělesa ve tvaru pravoúhlého hranolu ohybovým zatížením tak, aby došlo ke smykovému mezilaminárnímu porušení. Těleso uvažujeme jako jednoduchý nosník na dvou podpěrách, zatěžovaný zatěžovacím trnem umístěným uprostřed podpěr (Obr. 34). Tato metoda není limitována rozměry zkušebního tělesa, ale je omezena předepsaným poměrem vzdálenosti podpěr a délky zkušebního tělesa k tloušťce zkušebního tělesa. [45]



Obr. 34 Znárodnění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 14 130. [45]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRÁCE

Cílem praktické části je navrhnout a vyrobit kompozitní desky vyztužené různými typy tkaniny a vyhodnotit průběh výroby použité technologie a dále také provést zkoušky na interlaminární smyk připravených laminátů. Kompozity budou testovány podle tří norem, které jsou uvedené v teoretické části v kapitole 3.3.

Hlavní body pro dosažení stanovených cílů práce jsou:




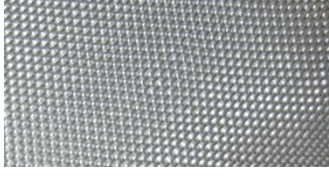

- Výběr vhodných vyztužných materiálů a matrice
- Výroba kompozitů a příprava zkušebních těles
- Provedení zkoušky dle normy ČSN 64 0662
- Provedení zkoušky dle normy ČSN EN ISO 15 310
- Provedení zkoušky dle normy ČSN EN ISO 14 130
- Vyhodnocení a diskuze výsledků

5 POPIS MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ LAMINÁTŮ

5.1 Výztuž

Pro přípravu jednotlivých typů laminátu bylo zvoleno více druhů výztuží, aby bylo možné porovnání jednotlivých výsledků zkoušek. Jednotlivé výztuže jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 6). Jutové tkaniny dodala firma Juteko bez bližší specifikace. Tkaninu skleněných vláken s plátňovou vazbou dodala firma Havel composites s označením Aeroglass. Jednosměrnou skleněnou tkaninu dodala firma Minova Bohemia s.r.o. s označením Glasspre. Uhlíkovou tkaninu dodala firma Kordárna Plus a.s. a má označení Kordcarbon.

Tab. 6 Použité tkaniny

Materiál	Obrázek tkaniny	Typ vazby	Plošná hmotnost [g/m ²]
Juta		plátňová	305
Juta		plátňová	427
Sklo		plátňová	220
Sklo		jednosměrná	250
Uhlík		keprová	280

5.2 Matrice

Na výrobu kompozitních vzorků byla použita pryskyřice určená k ručnímu nanášení, tato pryskyřice je dostupná od firmy Havel composites.

5.2.1 Araldid GY 764BD pryskyřice pro ruční laminování

Je to víceúčelová epoxidová laminační pryskyřice. Vzhledem ke své viskozitě je tato pryskyřice vhodná pro dlouhá zpracování ruční laminací. K vytvrzení této pryskyřice je určeno a použito Tvrdivlo H285.

Tab. 7 Vlastnosti kapalné pryskyřice při 25°C. [Příloha PI]

Vlastnosti	Pryskyřice Araldit GY 764BD	Tvrdivlo H285
Hustota [g/ml]	1	0,94-0,97
Viskozita [mPa.s]	690	60-100
Bod vzplanutí [°C]	>200	109
Směšovací poměr v hmotnostních dílech	100	40

Tab. 8 Vlastnosti nevyztužené vytvrzené pryskyřice. [Příloha PI]

Vlastnosti	Hodnoty
Hustota [g/cm ³]	1,05
Teplota skelného přechodu [°C]	60-65
Pevnost v ohybu [N/mm ²]	110-120
Pevnost v tlaku [N/mm ²]	110-115

6 POPIS POMOCNÝCH MATERIÁLŮ POUŽITÝCH PŘI RUČNÍ LAMINACI POD PRUŽNOU FOLIÍ

Při výrobě ruční laminací pod pružnou folií byly využity i některé pomocné materiály, z kterých se po dokončení výroby stává odpad. Jednotlivé pomocné materiály použité při výrobě jsou popsány v následujících kapitolách.

6.1 Separáční základní vosk

Jedná se o vysoce efektivn  podkladov  základní vosk pro základní povrchy s nízkými vlastnostmi sm  en , bez silikonu. Tento podkladov  vosk zlepšuje sm  itelnost svrchního povrchu. Samotn  separátor se pak snadněji rovnom rn  rozvrství a vytvo r  bezchybnou, lesklou separační vrstvu. Teplota pou it  do cca. 100 C. Je vhodn  ho pou ivat pod PVA separátor. Po nanesen  je nutné ho ihned rozleštit bavln n m had r kem. Ide ln  je nanést alespoň 2 vrstvy. Separátor PVA se nan s  houb  kou,  et cem nebo pistolí u st rkac  verze. [47]



Obr. 35 Separční vosk a PVA separátor

6.2 Odtrhov  tkanina

Je to tkanina ze syntetických vláken, obvykle z Nylonu, kter  je kladena p rmo na j i  impregnovan  v ztu n  tkaniny jako prv n  vrstva. Tato odtrhov  tkanina odděluje kone n  výrobek od pomocných materiálů (odsávací rohože) a zároveň propouští pryskyřici. Po vytvrzen  a odtržení zanechává ucelen , mikrobublinek zbaven  matn  povrch. [47]

- **Odrhová tkanina 83 g/m²** (s červenými pruhy) je vyrobena z vysokopevnostního Nylonu 66 a odolává teplotě až do 200°C (Obr. 36). [47]



Obr. 36 Odrhová tkanina

- **Odrhová tkanina Interglas** je ze skleněných tkanin a to ve dvou typech 64 g/m² a nebo 93 g/m². [47]
- **Odrhová tkanina 50 g/m²** je velmi kvalitní nízko-gramážní odtrhová tkanina. Může být i s dvojnásobně větší odtrhovou schopností a to díky speciálně upravenému povrchu pro snazší odtržení. Je to zejména výhoda pro složitější výrobky a pro větší množství odsávané pryskyřice. [47]

6.3 Odsávací rohož

Jedná se o rohož, která slouží při vakuování pro dokonalé celoplošné odsání vzduchu a přebytečné pryskyřice. Nejčastěji je vyráběna z Polyesterového materiálu. [48]

Tenká – 130 g/m², maximální teplota použití 204°C

Středně silná – 200 g/m², maximální teplota použití 204°C

Silná – 339 g/m², maximální teplota použití 204°C [48]

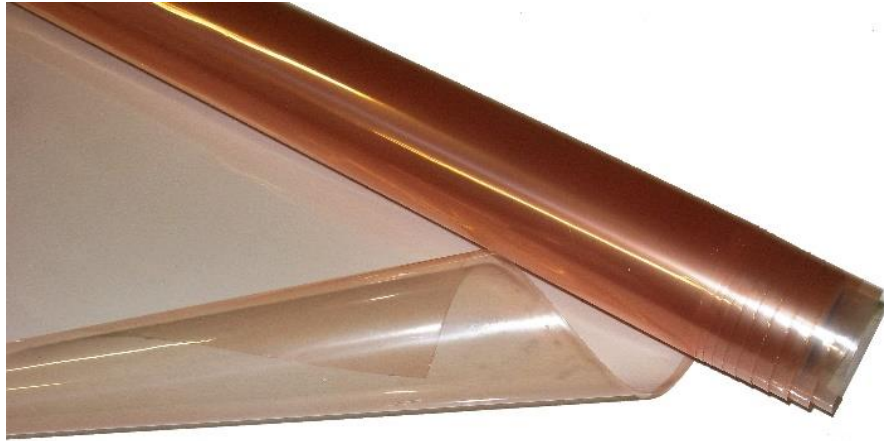


Obr. 37 Odsávací tkanina

6.4 Pružná folie

Pružná plastová folie nebo taky vakuová folie se vyrábí především z PE, PA, PTFE a je mechanicky, chemicky i tepelně odolná. Tato fólie umožňuje při výrobě vytvořit vakuum, většinou v horní části otevřené formy, kde slouží taktéž ke stlačení jednotlivých vrstev a to právě účinkem vakua. Existuje mnoho druhů, lišících se zejména maximální teplotou procesu. Pro příklad jsou uvedené dvě vakuové folie. [47]

- **Vakuovací fólie APA 6** je odolná proti působení styrenu obsaženého v polyesterových a vinylesterových pryskyřicích. Odolává také epoxidovým pryskyřicím. Jedná se o velmi pevnou folii, která udrží silné vakuum. Tloušťka folie z polyamidu je 0,04 mm. [47]
- **HAVEL Flex** je extrémně pružná, čirá fólie s velkým protažením. Odolná epoxidovým i polyesterovým pryskyřicím. Tloušťka fólie je 0,05 mm. [47]



Obr. 38 Pružná folie

6.5 Hadice

Hadice slouží pro odvod přebytečné pryskyřice a odsátí vzduchu pod pružnou folií. Je vyrobena z PE a používají se nejčastěji o průměru 10 - 12,5mm. Podle materiálového listu firmy AIRTECH je maximální teplota použití do 121°C. [48]



Obr. 39 Hadice

6.6 Těsnící páska

Tato těsnící oboustranná víceúčelová páska s vysokou přilnavostí slouží jako těsnící materiál mezi formou a vakuovou folií. Snadno se snímá z kovových i nekovových povrchů forem. Obvykle je základním materiálem syntetický kaučuk a může vydržet až do teplot 230°C. Dále se vyrábí také silikonové těsnící pásky a ty vydrží teploty až 430°C. [48]



Obr. 40 Těsnící páska

6.7 Vakuová vývěva

Vývěva vytváří vakuum v uzavřené formě nutné k celoplošnému prosycení, tak aby se dosáhlo všude stejné tloušťky a také pro odčerpání přebytečné pryskyřice do přepadové nádoby. V tomto případě je forma uzavřena pružnou vakuovou folií. Nejdůležitější vlastností vývěvy je její schopnost (výkon) pro vytvoření potřebného vakua (0,8 – 1,0 bar).



Obr. 41 Vakuová vývěva

6.8 Přepadová nádoba (rezervoár)

Nádoba je připojena mezi oba hlavní členy soustavy, formu a vývěvu a slouží jako nádrž, kde se zachytí přebytečná pryskyřice, která je z formy odsávána za pomoci vakua. Na rezervoáru se nejčastěji nalézá i tlakoměr.



Obr. 42 Rezervoár

7 VÝROBA LAMINÁTŮ S TKANINOVOU VÝZTUŽÍ

Jedním z hlavních cílů experimentální části je výroba laminátů s tkaninovou výztuží. Na výrobu byli použity jutové tkaniny, skleněné tkaniny a uhlíková tkanina a všechny byly prosyceny pryskyřicí určenou k ručnímu nanášení. Tyto tkaniny a pryskyřice jsou uvedeny a popsány v kapitole 5.

7.1 Výroba vzorků pomocí ruční laminace pod pružnou folii

7.1.1 Příprava formy

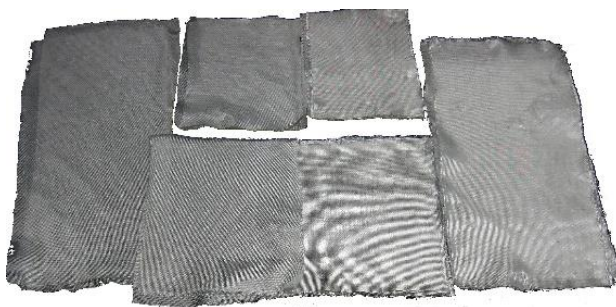
V prvním kroku je důležité nachystat a připravit formu k laminaci. Na všechny vzorky byla využita forma ze skla. Formu bylo potřeba pečlivě očistit a naseparovat, aby vzniklé kompozitní vzorky měli co nejlepší vzhled a zabránilo se nerovnostem a vadám na povrchu. Postup je takový:

- Odstranění nečistot a odmaštění za pomoci sěrky a příslušného prostředku.
- Nanesení a rozprostření stejné vrstvy separačního vosku
- Zasychání vosku po dobu 5 minut
- Další nanesení separačního vosku a zasychání po stejnou dobu
- Nanesení krycího filmu PVA
- Zasychání PVA filmu po dobu 5 minut

Takto nachystaná skleněná forma je připravena k samotné výrobě kompozitních desek.

7.1.2 Příprava tkaniny

Podle velikosti formy byly naměřeny a nastříhány příslušné tkaniny. S nastříhanou tkaninou je zapotřebí opatrně zacházet, aby nedocházelo k posunutí vazby a k zanesení případných nečistot a prachu na tkaninách. Dle počtu vrstev výsledného kompozitního vzorku se nastříhá příslušný počet tkanin pod úhlem 0° respektive 90° a také pod úhlem 45° respektive -45° .



Obr. 43 Nastříhané skleněné tkaniny

7.1.3 Příprava pryskyřice

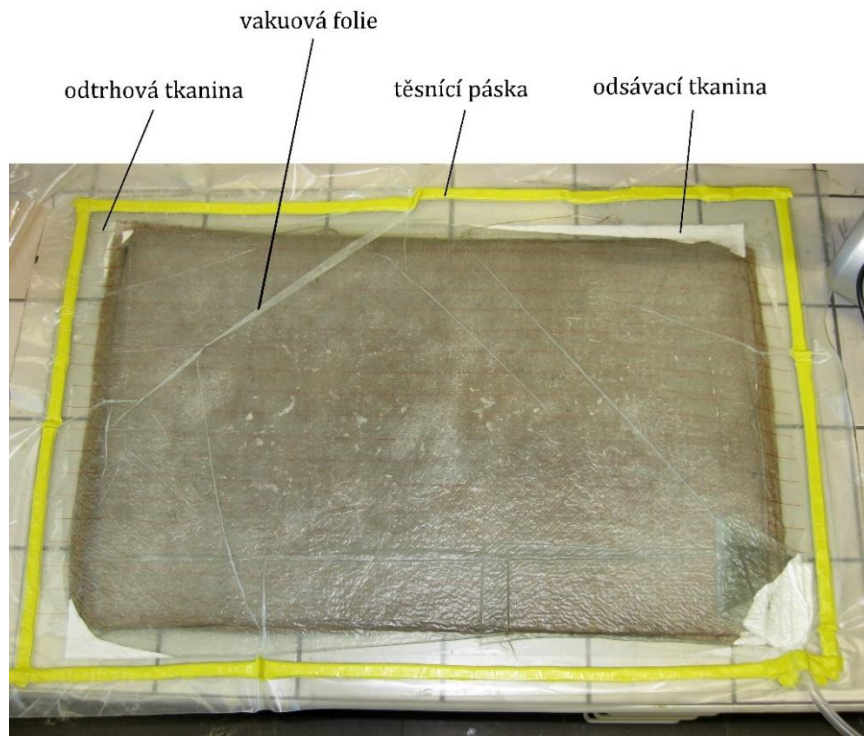
Množství pryskyřice se volí s ohledem na hmotnost připravených výztužných materiálů. V případě skleněných a uhlíkových tkanin byl zvolen poměr váhy tkaniny ku váze připravené pryskyřice roven 1 : 1,3. Naopak z důvodu velké hydrofilnosti jutových vláken, tedy značné savosti tohoto materiálu bylo nutné tento poměr zvýšit až na 1 : 1,8. Dle doporučení z materiálových listů bylo tvrdidlo přidávané v poměru 100:40, vše bylo dokonale promícháno a pryskyřice připravena k laminaci.

7.1.4 Nános pryskyřice a kladení vrstev tkanin na formu

Namíchaná směs pryskyřice s tvrdidlem se nanese na skleněnou formu a rozprostře se pomocí válečku po určené ploše. Při prvním nánosu je potřeba nanést větší množství směsi, aby nedošlo k vadám (vzduchovým bublinám) na pohledové straně vzorku. Do této vrstvy se položí první tkanina a na ní se znovu nanese směs a rozvrství pomocí válečku. Následně se použije rýhovaný (vytlačovací) váleček k zajištění dokonalého prosycení a stejnoměrné struktury bez vzduchových kapes. Tímto způsobem se postupuje až k požadované poslední vrstvě.

7.1.5 Kladení pomocných materiálů a stlačení pod pružnou folií

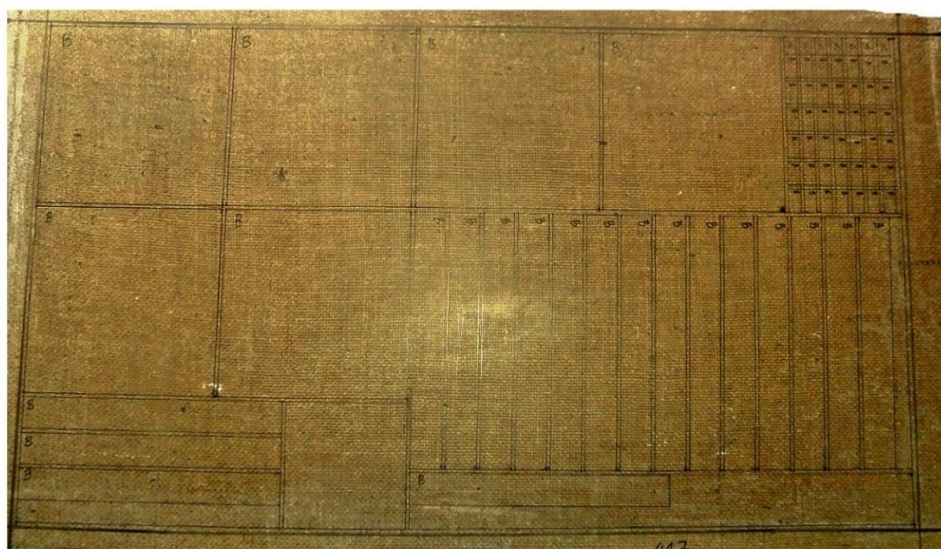
První pomocná vrstva je odtrhová tkanina, která se pokládá přímo na prosycenou výztuž. Následně se na tuto odrhovou tkaninu položí odsávací rohož a jako poslední se položí pružná vakuová folie, která pokrývá všechny předešlé vrstvy. Tato folie by měla být cca o 30% větší než odtrhová tkanina a měla by být volná (nenapnutá). Folie se nalepí a utěsní na formu pomocí těsnící pásky. Na závěr se pomocí podtlaku (vakuové vývěvy) o hodnotě minimálně 0,08 MPa stlačí všechny vrstvy k sobě (Obr. 44). Přebytková pryskyřice se pomocí vývěvy odsává a hadičkou se dostává do přepadové nádoby. Takto dokončený laminát se nechá vytvrdit za pokojové teploty po dobu 24 hodin.



Obr. 44 Pohled na zavakuovaný výrobek






7.1.6 Úprava laminátové desky na vzorky

Po 24 hodinách byl panel laminátu odformován a na jeho povrch byly narýsovány zkušební tělesa pro jednotlivé zkoušky (Obr. 45). Za pomoci diamantového kotouče na stolní řezačce Scheppach HS80 byly nařezány příslušná tělesa, která jsou uvedena v následující tabulce (Tab. 9).



Obr. 45 Příklad vyrobeného a orýsovaného laminátu

Tab. 9 Vyrobené kompozitní vzorky

Materiál	Povrch vzniklé desky	Plošná hmotnost výztuže [g/m ²]	Označení	Počet vrstev
Juta		305	A	7
Juta		427	B	7
Juta		427	C	10
Sklo		9 x 220 4 x 250	D	13
Uhlík		280	E	8

Výroba vzorků ruční laminací pod pružnou folií byla manuálně jednoduchá a relativně rychlá. Největší problém vznikal u jutových tkanin, které nebyli chemicky či fyzikálně upravené, tím pádem se vyznačovaly velkou nasákavostí, která vedla k nutnosti nanesení velkého množství pryskyřice. U skleněné a uhlíkové tkaniny již tento problém nenastal. Všechny vzorky vyrobené ruční laminací a stlačené pod folií byli celoplošně prosycené a bez výraznějších pohledových vad. Nevznikla zde ani žádná suchá místa a uzavřený vzduch (bubliny) se zde nacházeli jen sporadicky, převážně v okrajích, které byli ořezány. Celkově tedy vzorky vyrobené touto technologií měli vzhled na dostatečné úrovni.

- **Vzorek A**

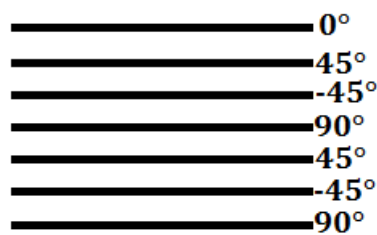
Je to vzorek, který je složený ze 7 vrstev jutové tkaniny. Tkanina má plošnou hmotnost 305 g/m^2 . Výsledná tloušťka byla 4,8 mm.



Obr. 46 Skladba výztuže vzorku A

- **Vzorek B**

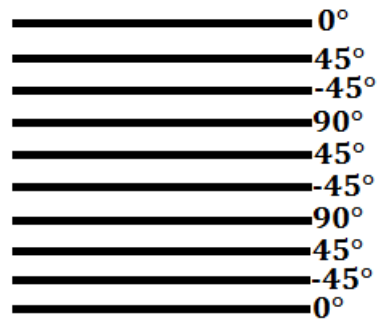
Je to vzorek, který je složený ze 7 vrstev jutové tkaniny. Tkanina má plošnou hmotnost 427 g/m^2 . Výsledná tloušťka byla 6,5 mm.



Obr. 47 Skladba výztuže vzorku B

- **Vzorek C**

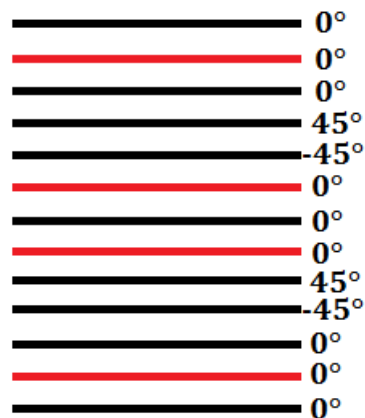
Je to vzorek, který je složený z 10 vrstev jutové tkaniny. Tkanina má plošnou hmotnost 427 g/m^2 . Výsledná tloušťka balý 9,5 mm.



Obr. 48 Skladba výztuže vzorku C

- **Vzorek D**

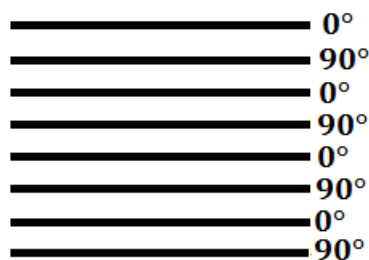
Je to vzorek, který je složený ze 13 vrstev skleněné tkaniny. Tkanina o plošné hmotnosti 220 g/m^2 (černá barva na Obr. 49) zastupuje 9 vrstev a jednosměrná tkanina o plošné hmotnosti 250 g/m^2 (červená barva na Obr. 49) zastupuje zbylé 4 vrstvy. Výsledná tloušťka byla 2,9 mm.



Obr. 49 Skladba výztuže vzorku D

- **Vzorek E**

Je to vzorek, který je složený z 8 vrstev uhlíkové tkaniny. Tkanina má plošnou hmotnost 280 g/m^2 . Výsledná tloušťka byla 2,9 mm.



Obr. 50 Skladba výztuže vzorku E

8 TESTOVÁNÍ VYROBENÝCH VZORKŮ

Všechny zkoušky byly provedeny v laboratoři na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně a to na stroji Zwick 1456 s použitím softwaru TestExpert II při pokojové teplotě. Ve všech zkouškách jsou jednotlivé vzorky označovány pro zjednodušení velkými počátečními písmeny abecedy (A, B, C, D, E), jak je uvedeno výše (Tab. 9). Vyhodnocované výsledky se liší podle zvolené zkoušky.

Technické údaje stroje Zwick 1456:

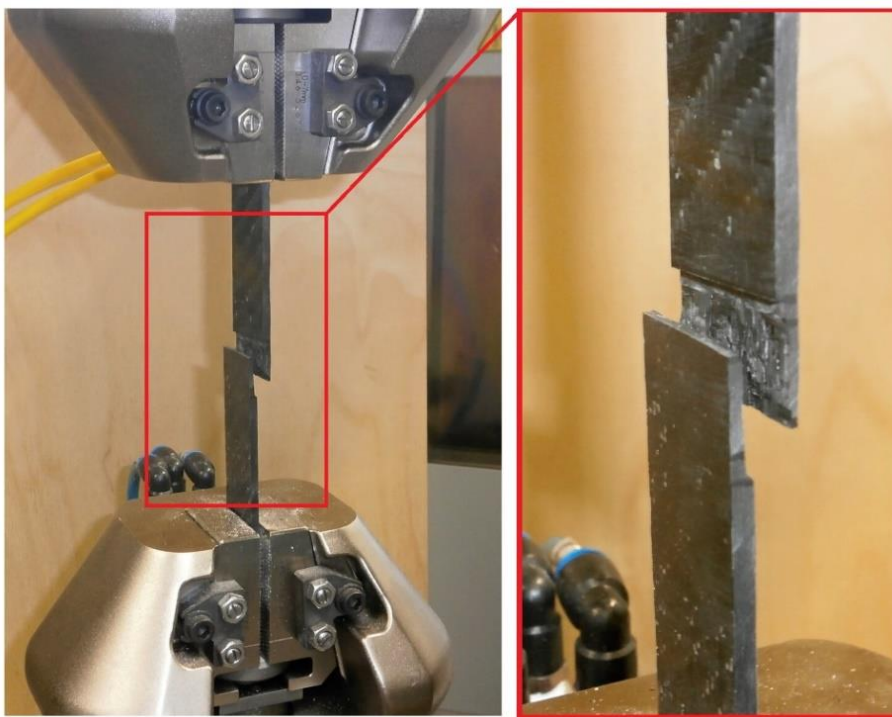
- | | |
|--------------------------------------|------|
| • Hmotnost [kg] | 150 |
| • Strojová výška [mm] | 1284 |
| • Celková výška [mm] | 2012 |
| • Celková šířka [mm] | 630 |
| • Šířka pracovního prostoru [mm] | 420 |
| • Maximální zkušební síla [kN] | 20 |
| • Maximální posuv příčnicku [mm/min] | 800 |



Obr. 51 Zkušební stroj Zwick 1456

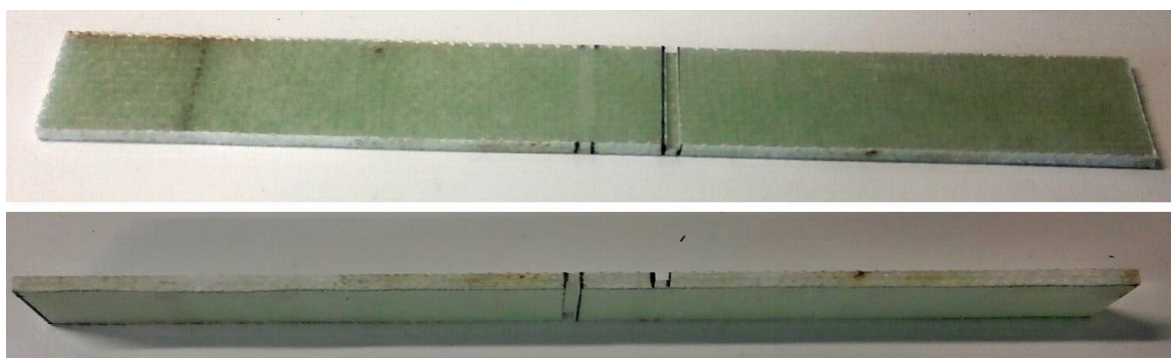
8.1 Zkouška ČSN 64 0662

Jedná se o zkoušku pro stanovení pevnosti ve smyku vyztužených plastů a je použitelná pro všechny typy laminátů. Pevnost ve smyku mezi vrstvami je mezní smykové napětí, při němž dojde k porušení zkušebního tělesa a to za předpokladu, že smykové napětí je ve smykové ploše rozloženo rovnoměrně.



Obr. 52 Pohled na upnutí a porušené těleso po zkoušce.

Testovaná zkušební tělesa byla o rozměrech 205 x 25 mm a tloušťky se lišili dle použité výztuže a počtu vrstev. Vzdálenost mezi zářezy byla stanovena dle normy na 12,5 mm. Takto připravené zkušební tělesa byla zatěžována tahovou silou a to až do doby kdy dojde ke smykovému porušení mezi vrstvami výztuže. Při smykovém porušení tělesa se odečte hodnota zatížení a použije se k výpočtu pevnosti ve smyku mezi vrstvami.



Obr. 53 ukázka vzorku pro zkoušku ČSN 64 0660

Při vyhodnocování všech provedených zkoušek byly užity následující statistické veličiny; *min* - nejnižší hodnota, *max* - nejvyšší hodnota, *median* – 50%-ní kvantil (rozděluje datový soubor tak, že polovina (50 %) hodnot je menších než medián a polovina (50 %) hodnot větších (nebo rovných)) *x* - označení pro aritmetický průměr, *s* - směrodatná odchylka, *v* - variační koeficient. [49]

V následujících tabulkách (Tab. 10-14) jsou uvedena jednotlivá naměřená data vzorků A, B, C, D a E. U každého typu bylo testováno více jak 5 zkušebních těles, v závislosti na dostupnosti a ceny materiálu.

Použité výsledky: hodnota zatížení při porušení tělesa - F [N]

pevnost ve smyku mezi vrstvami – τ_{PS} [MPa]

Tab. 10 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku A zkoušky ČSN 64 0662

Vzorek A		
	F [N]	τ_{PS} [MPa]
\bar{x}	1374	4,40
s	75	0,24
v [%]	5,48	5,48
MIN	1270	4,06
MAX	1570	5,02
MEDIAN	1360	4,35

Tab. 11 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku B zkoušky ČSN 64 0662

Vzorek B		
	F [N]	τ_{PS} [MPa]
\bar{x}	1433	4,58
s	146	0,47
v [%]	10,19	10,19
MIN	1190	3,81
MAX	1680	5,38
MEDIAN	1460	4,67

Tab. 12 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku C zkoušky ČSN 64 0662

Vzorek C		
	F [N]	τ_{PS} [MPa]
\bar{x}	1787	5,72
s	145	0,46
v [%]	8,11	8,11
MIN	1570	5,02
MAX	2010	6,43
MEDIAN	1800	5,76

Tab. 13 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku D zkoušky ČSN 64 0662

Vzorek D		
	F [N]	τ_{PS} [MPa]
\bar{x}	3837	12,28
s	562	1,80
v [%]	14,64	14,64
MIN	3060	9,79
MAX	4920	15,74
MEDIAN	3780	12,10

Tab. 14 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku E zkoušky ČSN 64 0662

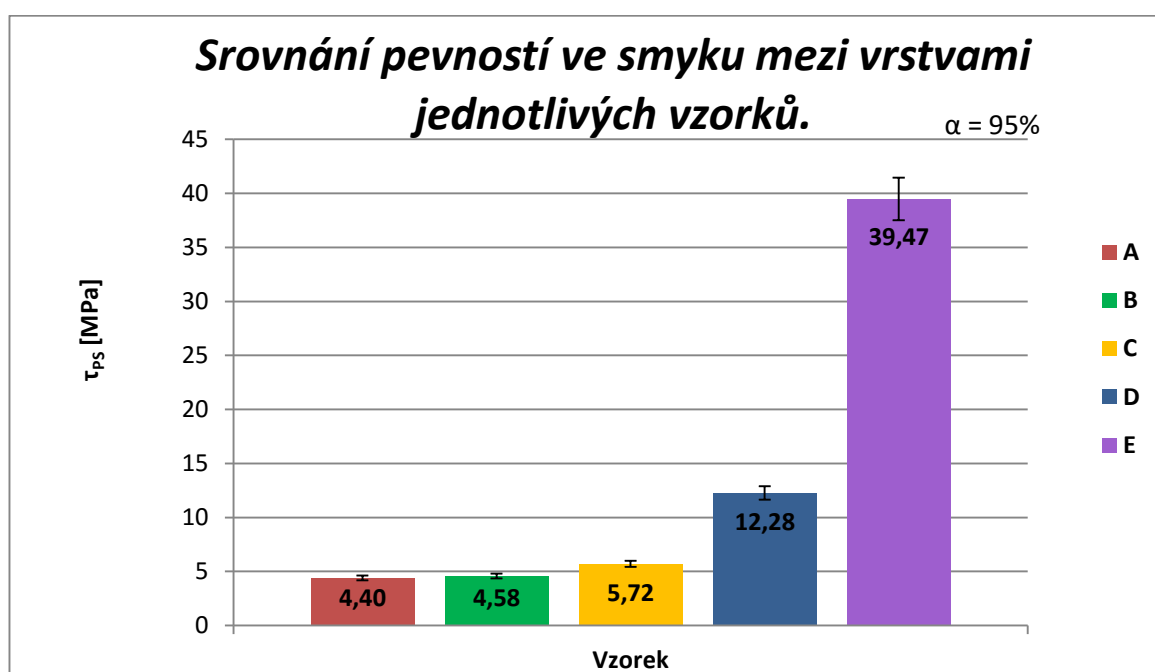
Vzorek E		
	F [N]	τ_{PS} [MPa]
\bar{x}	12336	39,47
s	1293	4,14
v [%]	10,48	10,48
MIN	10500	33,60
MAX	14300	45,76
MEDIAN	12100	38,72

8.1.1 Diskuze výsledků zkoušky ČSN 64 0662

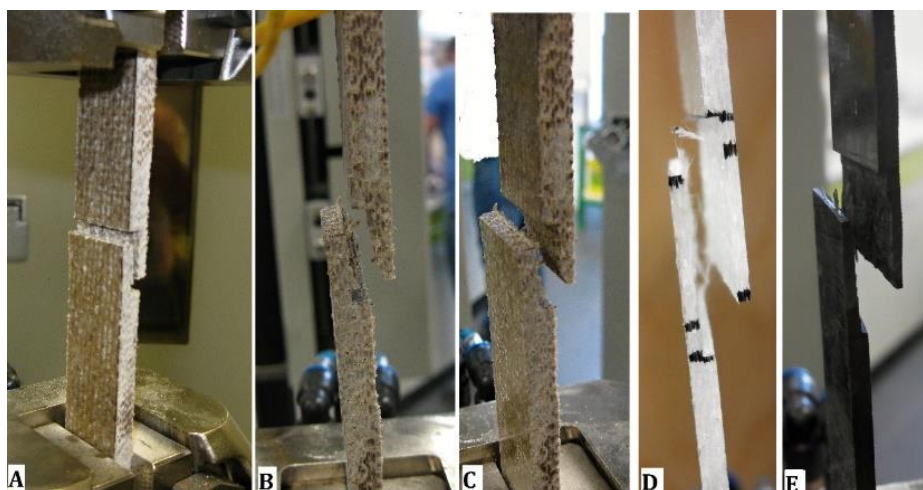
Z naměřených a vypočtených hodnot je evidentní, že zkušební tělesa s přírodní výztuží (A, B, C), konkrétně jutovou tkaninou mají nejnižší pevnost ve smyku mezi vrstvami a není ani příliš velký rozdíl pokud se použije tkanina s větší plošnou hmotností, to činí rozdíl 4 % a pokud se položí větší počet vrstev a výsledná tloušťka naroste o 3 mm, tak rozdíl činí 25 %. Zkušební těleso D se skleněnou tkaninou má více než dvakrát vyšší pevnost ve smyku mezi vrstvami než zmíněné zkušební tělesa s jutovou výztuží, i když výsledná tloušťka zkušební tělesa byla 2,9 mm. Smyková pevnost u zkušební tělesa D tedy dosahovala

průměrně 12,28 MPa. Nejlepší výsledky vykazovala zkušební tělesa E, která měla výztuž z uhlíkové tkaniny, v porovnání se zkušebními tělesy D při stejné tloušťce vykazovala pevnost ve smyku mezi vrstvami hodnoty průměrně o 221 % vyšší. Průměrná smyková pevnost zkušebních těles E teda dosahovala 39,5 MPa. U zkušebních těles A, B, C a E byl variační koeficient kolem 10 %, což ukazuje pouze na minimální ovlivnění hodnoty průměru směrodatnou odchylkou, avšak u zkušebních těles D byl již variační koeficient skoro 15 % a proto by bylo vhodné o něco rozšířit výběrový soubor.

V následujícím grafu (Obr. 54) jsou uvedeny průměrné hodnoty pevnosti ve smyku mezi vrstvami u připravených vzorků.



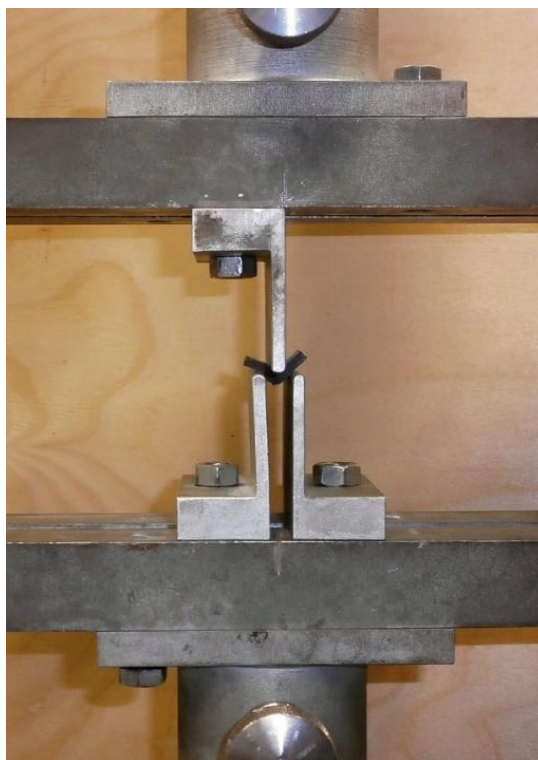
Obr. 54 Grafická interpretace srovnání pevností ve smyku mezi vrstvami.



Obr. 55 Ukázka vzorků po zkoušce

8.2 Zkouška ČSN EN ISO 14 130

Jedná se o zkoušku pro stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti vlákniny vyztužených plastových kompozitů metodou krátkého nosníku. Podstata spočívá v tělesu pravoúhlého hranolu, který se ohybově zatěhuje jako jednoduchý nosník tak, aby došlo ke smykovému mezilaminárnímu porušení.



Obr. 56 pohled na zkoušku ČSN EN ISO 14 130

Testovaná zkušební tělesa měly rozměry 20 x 10 mm a tloušťky se lišily dle použité výztuže a počtu vrstev. Vzdálenost mezi dvěma podpěrami byla zvolena 10 mm a těleso bylo zatěžováno zatěžovacím trnem umístěným uprostřed mezi podpěrami (Obr. 56).



Obr. 57 ukázka vzorků pro zkoušku ČSN EN ISO 14 130

V následujících tabulkách (Tab. 15-19) jsou uvedena jednotlivá naměřená data vzorků A, B, C, D a E. U každého typu bylo testováno 15 vzorků.

Použité výsledky: hodnota zatížení při porušení tělesa - F [N]

zdánlivá mezilaminární smyková pevnost – τ_M [MPa]

Tab. 15 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku A zkoušky ČSN EN ISO 14 130

Vzorek A		
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	1372	22,86
s	94	1,56
v [%]	6,84	6,84
MIN	1230	20,50
MAX	1510	25,17
MEDIAN	1390	23,17

Tab. 16 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku B zkoušky ČSN EN ISO 14 130

Vzorek B		
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	2989	39,33
s	121	1,59
v [%]	4,05	4,05
MIN	2810	36,97
MAX	3150	41,45
MEDIAN	3030	39,87

Tab. 17 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku C zkoušky ČSN EN ISO 14 130

Vzorek C		
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	3791	33,06
s	229	2,00
v [%]	6,05	6,05
MIN	3380	29,48
MAX	4120	35,93
MEDIAN	3830	33,40

Tab. 18 Naměřené hodnoty a vypočtené vzorku D zkoušky ČSN EN ISO 14 130

Vzorek D		
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	1426	37,51
s	345	9,08
v [%]	24,20	24,20
MIN	1020	26,84
MAX	1990	52,37
MEDIAN	1420	37,37

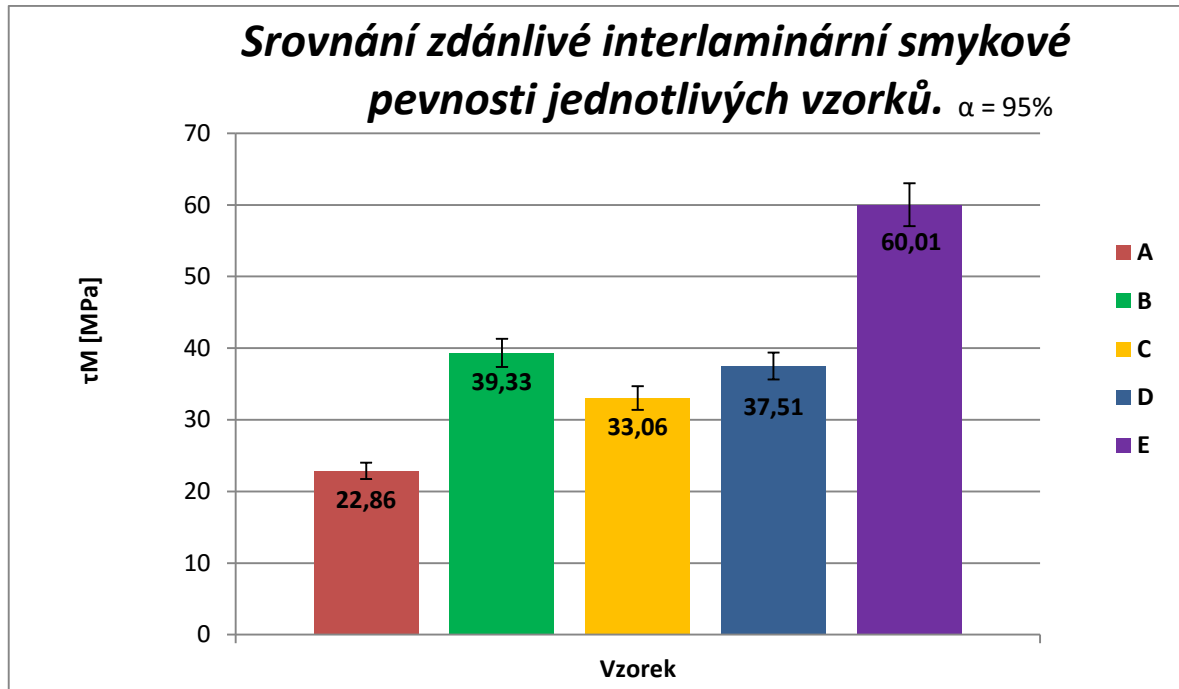
Tab. 19 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku E zkoušky ČSN EN ISO 14 130

Vzorek E		
	F [N]	τ_M [MPa]
\bar{x}	2281	60,01
s	145	3,82
v [%]	6,37	6,37
MIN	2080	54,74
MAX	2540	66,84
MEDIAN	2250	59,21

8.2.1 Diskuze výsledků zkoušky ČSN EN ISO 14 130

Z naměřených a vypočtených hodnot vyplývá, že zkušební tělesa E s uhlíkovou tkaninou mají téměř dvakrát vyšší smykovou pevnost než zkušební tělesa B, C, D a skoro třikrát vyšší než zkušební tělesa A. Zkušební tělesa E tedy dosáhly průměrné hodnoty 60 MPa. Zkušební tělesa D se skleněnou tkaninou vykazuje přibližně stejné hodnoty smykové pevnosti jako zkušební tělesa B a C s jutovou výztuží, avšak tyto zkušební tělesa B a C mají dvojnásobnou respektive trojnásobnou tloušťku. Zajímavé však je, že zkušební tělesa B, která mají sedm vrstev tkaniny, vykazují průměrně o 19 % lepší smykovou pevnost než zkušební tělesa C, která mají deset vrstev tkaniny o stejné plošné hmotnosti. Nejnižší hodnoty smykové pevnosti u této zkoušky vykazovala zkušební tělesa A s jutovou výztuží o plošné hmotnosti 305g/m² složenou ze sedmi vrstev a to průměrně 23 MPa. U zkušebních těles A, B, C a E je variační koeficient do deseti procent, který nám tedy udává velice dobrou samotnou spolehlivost aritmetického průměru, avšak u zkušebních těles D přesahuje hodnotu dvaceti procent, což už je vysoké číslo. Pomoc by mohlo například rozšířit výběrový soubor, ale už nebylo dostatek materiálu k výrobě a i vzhledem k ceně se od toho upustilo. Také se mohlo stát, že na některých zkušebních tělesech byla nějaká okem nepostřehnutelná vada, která se mohla stát při nešetrné manipulaci s jednotlivými tkaninami nebo při výrobě ruční laminací a z toho důvodu se tedy výsledky jednotlivých zkušebních těles typu D mohli pohybovat ve větším intervalu.

V následujícím grafu (Obr. 58) jsou uvedeny průměrné hodnoty mezilaminární smykové pevnosti u připravených vzorků.



Obr. 58 Grafická interpretace srovnání mezilaminární smykové pevnosti

8.3 Zkouška ČSN EN ISO 15 310

Jedná se o zkoušku pro stanovení smykového modulu pružnosti bez poškození zkušební tělesa. Princip zkoušky spočívá v bodovém namáhání zkušební tělesa ve tvaru čtvercové desky v každém rohu. Dva body desku podpírají v rozích po uhlopříčce a další dva body v opačných rozích vyvozují sílu na zkušební těleso (Obr. 59).



Obr. 59 Pohled na zatěžující se desku

Testovaná zkušební tělesa byly o rozměrech 150 x 150 mm a tloušťky se lišily dle použité výztuže a počtu vrstev. Deska se zatěžovala do poloviny své tloušťky pomocí šroubů, které měli upravené konce na polokoule. Smykový modul pružnosti se určí z lineární charakteristiky průběhu zatížení.



Obr. 60 ukázka vzorku pro zkoušku ČSN EN ISO 15 310

V následujících tabulkách (Tab. 20-24) jsou uvedena jednotlivá naměřená data vzorků A, B, C, D a E. U každého typu bylo testováno 6 zkušebních těles.

Použité výsledky: síla – $F1$ [N] při w_1

síla – $F2$ [MPa] při w_2

modul pružnosti ve smyku – G [GPa]

- **známé hodnoty pro vzorek A:** tloušťka desky $h = 4,8 \text{ mm}$;
průhyb $w_1 = 0,48 \text{ mm}$;
průhyb $w_2 = 1,44 \text{ mm}$;
korekční faktor $K = 0,822$

Tab. 20 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku A zkoušky ČSN EN ISO 15 310

Vzorek A			
	F ₁ [N]	F ₂ [N]	G [GPa]
\bar{x}	7,4	19,9	1,64
s	0,2	0,8	0,12
v [%]	2,80	4,07	7,04
MIN	7,0	18,3	1,41
MAX	7,6	21,0	1,76
MEDIAN	7,4	20,1	1,68

- **známé hodnoty pro vzorek B:** tloušťka desky $h = 6,5 \text{ mm}$;
průhyb $w_1 = 0,65 \text{ mm}$;
průhyb $w_2 = 1,95 \text{ mm}$;
korekční faktor $K = 0,822$

Tab. 21 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku B zkoušky ČSN EN ISO 15 310

Vzorek B			
	F ₁ [N]	F ₂ [N]	G [GPa]
\bar{x}	24,5	61,3	1,43
s	3,3	4,9	0,14
v [%]	1,48	8,02	10,09
MIN	18,0	54,0	1,13
MAX	28,0	66,0	1,55
MEDIAN	25,5	64,0	1,46

- **známé hodnoty pro vzorek C:** tloušťka desky $h = 9,5 \text{ mm}$;
průhyb $w_1 = 0,95 \text{ mm}$;
průhyb $w_2 = 2,85 \text{ mm}$;
korekční faktor $K = 0,822$

Tab. 22 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku C zkoušky ČSN EN ISO 15 310

Vzorek C			
	F ₁ [N]	F ₂ [N]	G [GPa]
\bar{x}	90,7	194,3	0,88
s	13,1	16,2	0,06
v [%]	14,50	8,35	7,17
MIN	70,0	173,0	0,84
MAX	111,0	220,0	1,02
MEDIAN	90,0	190,5	0,86

- **známé hodnoty pro vzorek D:** tloušťka desky $h = 2,9 \text{ mm}$;
průhyb $w_1 = 0,29 \text{ mm}$;
průhyb $w_2 = 0,87 \text{ mm}$;
korekční faktor $K = 0,822$

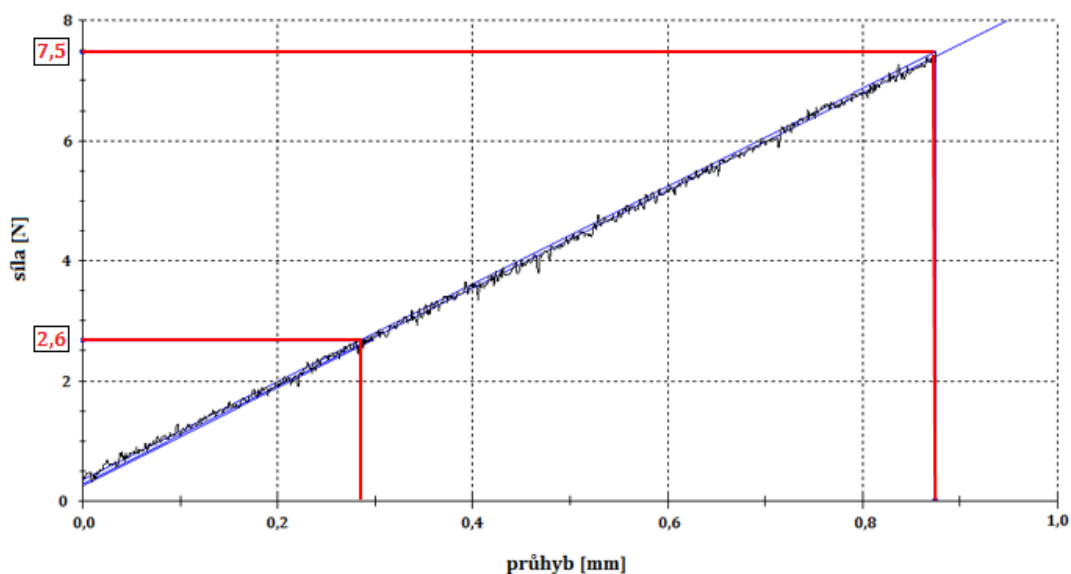
Tab. 23 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku D zkoušky ČSN EN ISO 15 310

Vzorek D			
	F ₁ [N]	F ₂ [N]	G [GPa]
\bar{x}	2,7	7,7	4,85
s	0,1	0,3	0,22
v [%]	4,56	4,14	4,48
MIN	2,6	7,4	4,61
MAX	3,0	8,3	5,20
MEDIAN	2,7	7,5	4,76

- **známé hodnoty pro vzorek E:** tloušťka desky $h = 2,9 \text{ mm}$;
průhyb $w_1 = 0,29 \text{ mm}$;
průhyb $w_2 = 0,87 \text{ mm}$;
korekční faktor $K = 0,822$

Tab. 24 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku E zkoušky ČSN EN ISO 15 310

Vzorek E			
	F_1 [N]	F_2 [N]	G [GPa]
\bar{x}	2,3	6,1	3,69
s	0,2	0,4	0,24
v [%]	6,64	6,50	6,62
MIN	2,1	5,7	3,43
MAX	2,5	6,7	4,12
MEDIAN	2,3	5,9	3,58



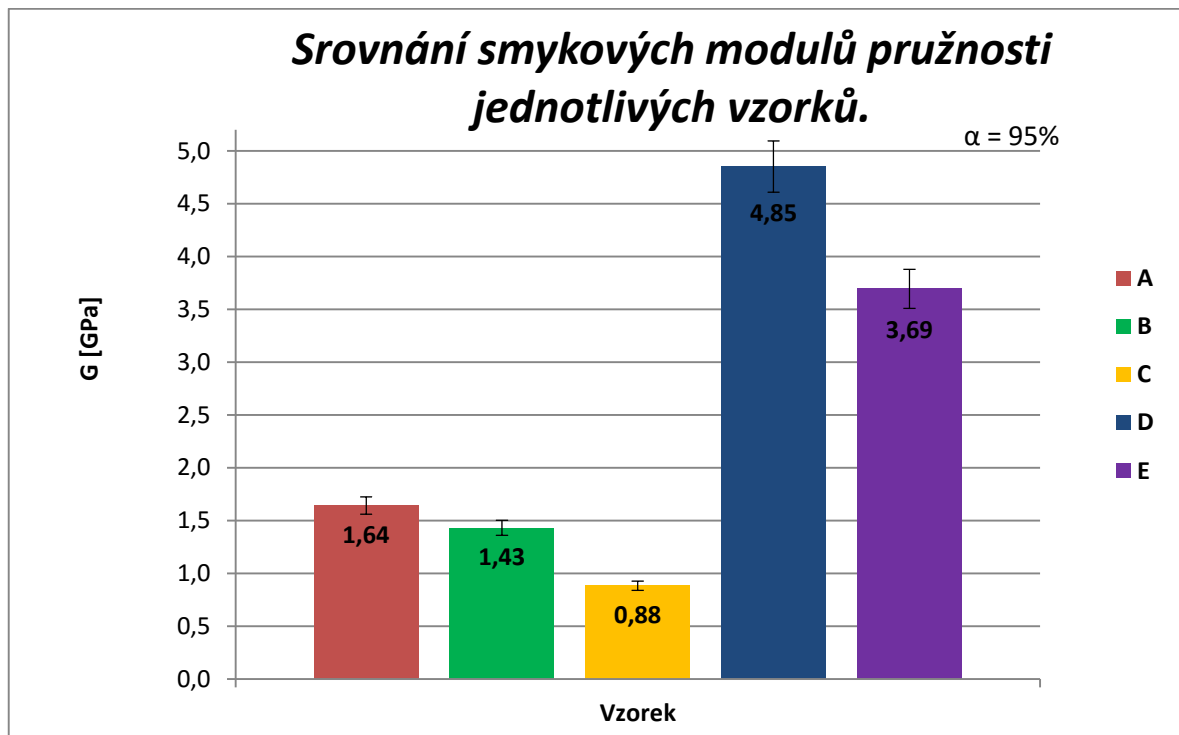
Obr. 61 Ukázka grafického průběhu síly při zatížení desky D

8.3.1 Diskuze výsledků zkoušky ČSN EN ISO 15 310

Z naměřených a vypočtených hodnot vyplývá, že nejvyššího smykového modulu pružnosti a to průměrně 4,85 GPa dosáhla zkušební tělesa D se skleněnou tkaninou. Přibližně o 1 GPa méně smykového modulu pružnosti dosahovala zkušební tělesa E s uhlíkovou výztuží, tedy o 24 % nižší hodnotu. O poznání horší výsledky vykazovaly zkušební tělesa A, B a C s jutovými výztužemi, kdy nejhůře dopadla zkušební tělesa C s průměrnou hodnotou 0,88 GPa složený z deseti vrstev výztuže o plošné hmotnosti 427 g/m^2 a v porovnání se

zkušebními tělesy B, který měl o tři vrstvy výztuže méně, měla zkušební tělesa C o 38 % nižší smykový modul pružnosti.

V následujícím grafu (Obr. 62) jsou porovnány průměrné hodnoty smykových modulů pružnosti u připravených vzorků.



Obr. 62 Grafická interpretace srovnání smykových modulů pružnosti

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vyrobit kompozity s tkaninovou výztuží a otestovat je na interlaminární smyk. Zkoušení kompozitů má velký význam, i když výsledné vlastnosti vznikají až při výrobě samotných součástí, tak je důležité mít předem představu, jak se který materiál chová.

V experimentální části jsou uvedeny použité materiály a technologie pro výrobu zkušebních vzorků. Pro tuto potřebu byly vybrány tři druhy materiálů výztuže o různé plošné hmotnosti a počtu vrstev a jako pojivo se užívalo pro všechny typy výztuží jeden druh pryskyřice pro ruční laminování. Vybrané materiály byly zastoupeny přírodní tkaninou a to konkrétně jutou, dále pak byla použita skleněná tkanina a uhlíková tkanina.

Lamináty byly vyrobeny pomocí ruční laminace a stlačeny byly jednotlivé vrstvy s přispěním vakuové vývěvy pod pružnou folii. Vyrobeno bylo pět druhů laminátových desek, které se označili velkými počátečními písmeny abecedy (A, B, C, D, E).

Po výrobě vzorků byly provedeny mechanické zkoušky se zaměřením na smykové vlastnosti. Jednalo se o zkoušky dle norem ČSN 64 0662 (pevnost ve smyku mezi vrstvami), ČSN EN ISO 14 130 (zdánlivá mezilaminární smyková pevnost) a ČSN EN ISO 15 310 (modul pružnosti ve smyku). Všechny zkoušky probíhaly za pokojové teploty 23°C.

U zkoušky ČSN 64 0662 bylo zjištěno, že vyrobené vzorky laminátů A, B a C s jutovou výztuží zdaleka nedosahují takové smykové pevnosti jako lamináty s uhlíkovou, nebo i skleněnou výztuží a to ani, když se dvojnásobně či trojnásobně zvětší tloušťka.

U zkoušky ČSN EN ISO 14 130 se potvrdilo, že znovu největší smykovou pevnost vykazovala zkušební tělesa E s uhlíkovou výztuží. Překvapivé však je, vzhledem k předchozí zkoušce, že zkušební tělesa B s jutovou výztuží vykazovali tentokrát vyšší smykovou pevnost než zkušební tělesa D se skleněnou výztuží a zkušební tělesa C s jutovou výztuží o dvojnásobné tloušťce.

U zkoušky ČSN EN ISO 15 310 se zjistilo, že vyrobený vzorek laminátu D se skleněnou výztuží dosahoval nejvyššího modulu pružnosti ve smyku. I zde se potvrdilo, že vzorky laminátů A, B a C s jutovými výztužemi nedosahují takových smykových vlastností jako vzorky laminátů D a E se skleněnou respektive uhlíkovou výztuží. U laminátů s jutovými výztužemi je zajímavé, že se zmenšující se tloušťkou narůstá smykový modul pružnosti.

Po shrnutí všech výsledků lze usoudit, že využití synergického chování kompozitu úzce souvisí s kvalitou soudržnosti mezi vyztužujícími vlákny a matricí. Kvalitu lze ovlivnit volbou vhodných vyztužujících vláken a matrice, ale určitě také i technologií výroby. Kompozitní materiály s uhlíkovou výztuží, se vyznačují lepšími smykovými vlastnostmi v porovnání s jinými druhy výztuže. Je to způsobeno strukturou uhlíkového vlákna. Atomy uhlíkového vlákna jsou spojeny v krystaly orientované paralelně k dlouhé ose vlákna a díky takovému uspořádání mikroskopických krystalů vyniká uhlíkové vlákno na svou velmi malou tloušťku vysokou pevností.

V současné době je všeobecné využití kompozitů stále na vzestupu. Velmi žádané je nyní nahrazovat syntetické materiály těmi přírodními a proto, zde byly testovány i přírodní jutové výztuže a i když nevykazovali takové hodnoty jako skleněné a uhlíkové výztuže, může to být námět na pokračování této práce za použití jiných přírodních materiálů a výrobních technologií, aby se dosáhlo přibližně stejných hodnot jako u syntetických materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kompozitní materiály ve stavebnictví. *tzbinfo* [online]. 2013 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>
- [2] Kompozity s bioplňivý. *TACR* [online]. 2011 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <https://www.tacr.cz/index.php/cz/zajimave-projekty/384-kompozity-s-bioplňivy-uspesne-reseni-cr.html>
- [3] Manufacturing. *NetComposites* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/>
- [4] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 8021424435.
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 8072042483.
- [6] Keramika, kompozity, polymery. *Pedagogická fakulta Masarykovy university* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm>
- [7] Kompozity. *KMT* [online]. 2009 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm
- [8] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 9788073722791.
- [9] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [10] Kompozitní materiály mění svět. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kompozitni-materialy-meni-svet.html>
- [11] Kompozity: Zdeněk Kořínek. *Mujweb* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [12] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 807043273X.
- [13] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [14] Molekulární struktura polymerů. *Katedra strojírenské technologie* [online]. 2004 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p2/Molekularni%20struktura.pdf

- [15] HARPER, Charles A. *Handbook of plastics, elastomers, and composites*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2002. ISBN 0071384766.
- [16] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 9788070806623.
- [17] REINHART, Theodor J. *Composites* .: Ohio: Metals Park, 1987. ISBN 0871702797.
- [18] DEBORAH D.L. CHUNG. *Composite materials science and applications*. 2nd ed. London: Springer, 2010. ISBN 9781848828315.
- [19] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 8001023419.
- [20] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. *Havel Composites* [online]. 2014 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecnny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [21] TOOLCRAFT CONRAD 238066 Carbon roving. *Conrad* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.conrad.com/ce/en/product/886601/TOOLCRAFT-CONRAD-238066-Carbon-roving-1610-tex-177-gm-20-m>
- [22] E-GLASS CHOPPED STRAND MAT. *QUIMIASIATICO DE COMPOSITES* [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://www.grupo-quimiasiatico.com/productos-composites-fibra-vidrio-resinas-poliester/en/>
- [23] Fiber Glass Mat. *Multitechproducts* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.multitechproducts.com/fiber-glass-mat-50-wide/>
- [24] Carbon fiber. *Central carbon fiber* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.centralcarbonfiber.com/>
- [25] Mechanika kompozitních materiálů. *Katedra mechaniky* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/229-umm-6.pdf>
- [26] Sisalové vlákno přírodní. *Rozmanitosti* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.rozmanitosti.eu/zbozi/6518/Sisalove-vlakno-prirodni-20g.htm>
- [27] Kevlar. *Specwar* [online]. 2010 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://technologie.specwar.info/kevlar/>
- [28] *Kompozity Michalík* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.kompozity-michalik.cz/galerie/n/120>
- [29] HOMG 011Swiss FG. *Rey* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.rey.cz/cs/catalog/hokejbal-brankar/product/homg-011-swiss-fg>
- [30] Kompozitová hůl. *Hokej sport* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.hokejsport.cz/kompozitove-hole-youth/kompozitova-hul-bauer-nexus-n6000-youth>

- [31] Konopné plasty a jiné přírodniny. *Magazín-legalizace* [online]. 2011 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.magazin-legalizace.cz/cs/articles/detail/131-konopne-plasty-a-jine-prirodniny?magazineId=27>
- [32] Polyamidová vlákna která zachraňují životy. *Techmagazín* [online]. 2015 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/2013>
- [33] Fiber basalt plus. *Triker* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://triker.cz/c-374/Novinka-fiber-basalt-plus-pp-rct-trubka-s-cedicovym-vlaknem/>
- [34] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 8070805684.
- [35] Výroba rotorového listu větrné elektrárny. *Csve* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/en/clanky/vyroba-rotoroveho-listu-vetrne-elektrarny/315#prettyPhoto>
- [36] Technologie výroby kompozitů. *Havel composites* [online]. 2014 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [37] Rusnáková Soňa. *Přednášky z předmětu zpracovatelské inženýrství kompozitů T5ZIK*. 2011. FT UTB.
- [38] Vacuum Infusion Processing (VIP), RTM Light (LRTM, Resin Infusion, VARTM, SCRIMP). *Molded fiber glass companies* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.moldedfiberglass.com/processes/processes/closed-molding-processes/vacuum-infusion-molding>
- [39] HONEYCOMB SANDWICH DESIGN TECHNOLOGY. *HexWeb* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf
- [40] GUIDE TO COMPOSITES. *Gurit* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>
- [41] Zpracování kompozitů. *Publi* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/18.html>
- [42] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [43] ČSN 64 0662. *Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů*. Praha: Český normalizační ústav, 1973.
- [44] ČSN EN ISO 15 310. *Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky*. Praha: Český normalizační ústav, 2006.

- [45] ČSN EN ISO 14 130. *Vlákny vyztužené plastové kompozity - Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku*. Praha: Český normalizační ústav, 1999.
- [46] ČSN EN ISO 14129. *Vlákny vyztužené plastové kompozity- Tahová zkouška $\pm 45^\circ$ laminátch pro stanovení křivky smykové napětí/smyková deformace, smykového modulu a smykové pevnosti v rovině*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [44] Katalog: pomocné materiály a nářadí. *Havel composites* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://www.havel-composites.com/ktlgfiles/cz_katalog.pdf
- [48] Vacuum Bagging and Composite Tooling Materials: Products. *AIRTECH* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.airtechintl.com/en/products>
- [49] *Statistika* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://absolventi.gymcheb.cz/2006/jamotyc/seminarka/modus.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

RTM	Vysokotlaké vstřikování
VARTM	Vysokotlaké vstřikování pomocí vakua
L-RTM	Vysokotlaké vstřikování pomocí vakua
RFI	Resin film infusion
PET	Polyethylentereftalát
UP	Nenasycený polyester
VE	Vinilester
EP	Epoxid
PP	Polypropylen
PA	Polyamid
UP-R	Nenasycená polyesterová pryskyřice
VE-R	Vinylesterová pryskyřice
EP-R	Epoxidová pryskyřice
PAN	Polyakrylonitril
HS	Vysokopevnostní
HM	Vysokomodulové
E_{TT}	Modul pružnosti v příčném směru
σ_{FL}	Pevnost v tahu
ρ	Hustota
τ_{12}	Smykové napětí v rovině
F	Zatěžující síla
b	Šířka
h	Tloušťka
τ_{12M}	Smyková pevnost v rovině

γ_{12}	Smyková deformace
G	Modul pružnosti ve smyku
M_k	Kroutící moment
τ	Smykové napětí
r	Poloměr
PVA	Polyvinilalkohol
PE	Polyethylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
τ_{PS}	Pevnost ve smyku mezi vrstvami
min	Minimální hodnota
max	Maximální hodnota
x	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka
v	Variační koeficient
τ_M	Zdánlivá mezilaminární smyková pevnost
w	průhyb
K	korekční faktor

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Znázornění synergického efektu v kompozitním materiálu [8]	13
<i>Obr. 2</i> Využití kompozitních materiálů v případě Airbus A380 [10].....	14
<i>Obr. 3</i> Rozdělení kompozitů [12]	16
<i>Obr. 4</i> Nadmolekulární struktura polymeru [14]	18
<i>Obr. 5</i> Zjednodušené schéma procesu vytvrzení reaktoplastu. (a) Monomery a oligomery. (b) Proces růstu a větvení při zvyšování viskozity. (c) Gelový stav za nevratným bodem gelace. (d) Plně vytvrzený reaktoplast [8].....	20
<i>Obr. 6</i> Vznik zesíťované struktury [16].....	21
<i>Obr. 7</i> Základní suroviny pro výrobu VE-R [4].....	21
<i>Obr. 8</i> Chemická reakce v epoxidové pryskyřici [18]	22
<i>Obr. 9</i> Typy vláknových výztuží [12]	24
<i>Obr. 10</i> Ukázka roving z uhlíkových vláken [21]	24
<i>Obr. 11</i> Rohože ze skleněných vláken [22]	25
<i>Obr. 12</i> Používané typy vazeb [20]	26
<i>Obr. 13</i> Skleněná vlákna [23]	27
<i>Obr. 14</i> Uhlíková vlákna [24].....	28
<i>Obr. 15</i> ukázka sisalového vlákna [26]	30
<i>Obr. 16</i> Carbon- kevlarová tkanina [28].....	30
<i>Obr. 17</i> Ukázka některých výrobků z různých vláken. A- brankařská maska ze skleněných vláken, B- hokejová hůl z uhlíkových vláken, C- elegantní židle z vláken konopí, D- kevlarová balistická vesta, E- tři vrstvá trubka s čedičovým vláknem [29, 30, 31, 32, 33].....	32
<i>Obr. 18</i> Ruční kladení polymerního kompozitu [35]	34
<i>Obr. 19</i> Vakuové prosycování [38].....	35
<i>Obr. 20</i> Autokláv [13].....	36
<i>Obr. 21</i> Schéma vytvrzování v peci a výsledný výrobek [39]	36
<i>Obr. 22</i> Schéma stříkání [40]	37
<i>Obr. 23</i> Princip metody RTM [41]	39
<i>Obr. 24</i> Princip technologie L-RTM [41].....	39
<i>Obr. 25</i> Schéma RFI- Resin film infusion [3]	40
<i>Obr. 26</i> Smykové napětí aplikované na kompozitní materiál [40]	42
<i>Obr. 27</i> Diagram smykové napětí/smyková deformace [46]	43

<i>Obr. 28 Vliv směru smykových napětí na způsob zatížení [13]</i>	43
<i>Obr. 29 Zkouška trubky krutem [42]</i>	44
<i>Obr. 30 Zkouška „obrazovým rámem“ ke zjištění rovinných smykových vlastností. [42]</i>	45
<i>Obr. 31 Vzorky se dvěma přesazenými vruby pro zkoušku interlaminárního smyku. [42]</i>	46
<i>Obr. 32 Zkušební těleso pro ČSN 64 0662. [43]</i>	46
<i>Obr. 33 Znázornění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 15310. [44]</i>	47
<i>Obr. 34 Znázornění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 14 130. [45]</i>	48
<i>Obr. 35 Separáční vosk a PVA separátor</i>	53
<i>Obr. 36 Odtrhová tkanina</i>	54
<i>Obr. 37 Odsávací tkanina</i>	55
<i>Obr. 38 Pružná folie</i>	56
<i>Obr. 39 Hadice</i>	56
<i>Obr. 40 Těsnicí páska</i>	57
<i>Obr. 41 Vakuová vývěva</i>	57
<i>Obr. 42 Rezervoár</i>	58
<i>Obr. 43 Nastříhané skleněné tkaniny</i>	59
<i>Obr. 44 Pohled na zavakuovaný výrobek</i>	61
<i>Obr. 45 Příklad vyrobeného a orýsovaného laminátu</i>	61
<i>Obr. 46 Skladba výztuže vzorku A</i>	63
<i>Obr. 47 Skladba výztuže vzorku B</i>	63
<i>Obr. 48 Skladba výztuže vzorku C</i>	64
<i>Obr. 49 Skladba výztuže vzorku D</i>	64
<i>Obr. 50 Skladba výztuže vzorku E</i>	64
<i>Obr. 51 Zkušební stroj Zwick 1456</i>	65
<i>Obr. 52 Pohled na upnutí a porušené těleso po zkoušce</i>	66
<i>Obr. 53 ukázka vzorku pro zkoušku ČSN 64 0660</i>	66
<i>Obr. 54 Grafická interpretace srovnání pevností ve smyku mezi vrstvami</i>	69
<i>Obr. 55 Ukázka vzorků po zkoušce</i>	69
<i>Obr. 56 pohled na zkoušku ČSN EN ISO 14 130</i>	70
<i>Obr. 57 ukázka vzorků pro zkoušku ČSN EN ISO 14 130</i>	70
<i>Obr. 58 Grafická interpretace srovnání mezilaminární smykové pevnosti</i>	73

<i>Obr. 59 Pohled na zatěžující se desku</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 60 ukázka vzorku pro zkoušku ČSN EN ISO 15 310</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 61 Ukázka grafického průběhu síly při zatížení desky D</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 62 Grafická interpretace srovnání smykových modulů pružnosti</i>	<i>78</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Vlastnosti pryskyřic [11]</i>	19
<i>Tab. 2 Vlastnosti jednotlivých druhů skel [5]</i>	27
<i>Tab. 3 Základní mechanické vlastnosti uhlíkových vláken [25]</i>	29
<i>Tab. 4 Mechanické vlastnosti aramidových vláken [13]</i>	31
<i>Tab. 5 Výrobní postup jednotlivých operací RTM technologie [41]</i>	38
<i>Tab. 6 Použité tkaniny</i>	51
<i>Tab. 7 Vlastnosti kapalné pryskyřice při 25°C. [Příloha PI]</i>	52
<i>Tab. 8 Vlastnosti nevyztužené vytvrzené pryskyřice. [Příloha PI]</i>	52
<i>Tab. 9 Vyrobené kompozitní vzorky</i>	62
<i>Tab. 10 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku A zkoušky ČSN 64 0662</i>	67
<i>Tab. 11 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku B zkoušky ČSN 64 0662</i>	67
<i>Tab. 12 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku C zkoušky ČSN 64 0662</i>	68
<i>Tab. 13 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku D zkoušky ČSN 64 0662</i>	68
<i>Tab. 14 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku E zkoušky ČSN 64 0662</i>	68
<i>Tab. 15 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku A zkoušky ČSN EN ISO 14 130</i>	71
<i>Tab. 16 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku B zkoušky ČSN EN ISO 14 130</i>	71
<i>Tab. 17 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku C zkoušky ČSN EN ISO 14 130</i>	71
<i>Tab. 18 Naměřené hodnoty a vypočtené vzorku D zkoušky ČSN EN ISO 14 130</i>	71
<i>Tab. 19 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku E zkoušky ČSN EN ISO 14 130</i>	72
<i>Tab. 20 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku A zkoušky ČSN EN ISO 15 310</i>	75
<i>Tab. 21 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku B zkoušky ČSN EN ISO 15 310</i>	75
<i>Tab. 22 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku C zkoušky ČSN EN ISO 15 310</i>	76
<i>Tab. 23 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku D zkoušky ČSN EN ISO 15 310</i>	76
<i>Tab. 24 Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku E zkoušky ČSN EN ISO 15 310</i>	77

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI Pyskyřice Araldit GY 764BD

Příloha PII CD disk s diplomovou prací ve formátu .pdf

PŘÍLOHA P I: PRYSKYŘICE ARALDIT GY 764BD



SKOLIL KOMPOZIT s.r.o.

Performance
Polymers

Tooling Systems

Víceúčelová laminační pryskyřice

®Araldit GY 764BD

Tvrdidlo H285

nebo

Tvrdidlo H286

Epoxidová laminační pryskyřice

100 hmot. dílů

40 hmot. dílů

40 hmot. dílů

- Specifické vlastnosti**
- středně reaktivní laminační systém s nízkou viskozitou
 - zpracování při pokojové teplotě
 - vytvrzuje při pokojové teplotě

- Použití**
- Laminační systém pro ruční laminaci

**Technické
parametry**

Vlastnost	Viskozita při 25 °C (mPa.s)	Hustota (g/cm3)	Bod vzplanutí DIN 51758 (°C)	Skladovatelnost 18-25 °C
Araldit GY764BD	690	1.0	>200	3 rok
Tvrdidlo H285 (H286)	60 - 100	0,94-0,97	109	1 rok

Zpracování

Směšovací poměry

Komponenta	Hmotnostní díly	Objemové díly
Araldit GY764 BD	100	100
Tvrdidlo H285	40	42

Komponenta	Hmotnostní díly	Objemové díly
Araldit GY764 BD	100	100
Tvrdidlo H286	40	42

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Viskozita při 23 °C	mPa.s	300 – 350
Doba zpracovatelnosti 100g směsi při 23 °C	min	40-45 s tvrdidlem H285 100-120 s tvrdidlem H286
Doba vytvrzení při 23 °C	hod	12-16+ s tvrdidlem H285 18-24+ s tvrdidlem H286

+ v závislosti na teplotě okolí a tloušťce laminované vrstvy

Vlastnosti

Po vytvrzení 7 dní při pokojové teplotě nebo 14 hod při 40 °C

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Hustota	g/cm3	1.05
Tvrdost Shore D ISO 686	ShoreD	85
Pevnost v tlaku ISO 604	N/mm2	110 - 115
Ohybová pevnost ISO 178	N/mm2	110 - 120
Teplota skleného přechodu	(°C)	60-65+
Nasákavost 24 hod /23 °C	(%)	0.20 – 0.30
Nasákavost 3 dny / 23 °C	(%)	0.30 – 0.40

+ v závislosti na temperačním cyklu

Skladování

Produkty uvedené v tomto datovém listu je nutno skladovat při teplotách 10- 30°C. Těmto podmínkám odpovídá doba zpracovatelnosti uvedená na obalu.

Bezpečnostní opatření

Pozor!

Produkty firmy Huntsman Advanced Materials lze zpracovávat bez jakéhokoli nebezpečí, jestliže jsou dodržovány obvyklé postupy při práci s chemikáliemi. Nevytvrzené materiály nedávejte do blízkosti požívatin. Z důvodu zabránění nežádoucí alergické reakce organismu se doporučuje použít gumové nebo plastické rukavice stejně jako ochranné brýle. Po každé práci je nutno umýt si ruce teplou vodou. Nedoporučuje se používat ředidla. Po umytí ruce otřete do papírových (ne textilních) ubrousků na jedno použití. Pracovní prostor musí být dobře odvětrán, pracovní místo odsáváno. Přesný popis bezpečnostních opatření najdete v příručce „hygiéna práce a způsoby zpracování produktů“ firmy Ciba Spezialitätenchemie GmbH (publ. Č. 24 264/d) stejně jako v bezpečnostních listech jednotlivých produktů. Rádi Vám tuto publikaci zašleme.

Ciba Spezialitätenchemie Performance Polymers

Naše technické rady pro zpracování materiálů odpovídají dnešnímu stavu našich znalostí. Přesto nezapomínejte na vlastní zkoušky materiálů v souvislosti s Vaším konkrétním použitím, zkušenostmi atd. Vlastní použití materiálů je mimo naši kontrolu a jste za ně plně odpovědní. Zaručujeme bezvadnou kvalitu odpovídající našim všeobecným podmínkám prodeje a dodání.

Huntsman GmbH
Breitenfurterstrasse 251
1231 – Wien
Rakousko
Tel. 0043 1 801 32 0
Fax.0043 1 801 32 421

SKOLIL KOMPOZIT s.r.o.
Jankovcova 1059/12B
170 00 Praha 7
CZ
Tel/Fax 00420 220 873 550, 551
E-mail: skolilkompozit@skolilkompozit.cz