

Výzkum infuzních procesů zpracování kompozitních materiálů a jejich optimalizace

Bc. Martin Bambuch

Diplomová práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Bambuch**
Osobní číslo: **T15396**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Výzkum infuzních procesů zpracování kompozitních materiálů a jejich optimalizace**

Zásady pro vypracování:

1. Literární část
2. Vakuové technologie (vakuové prosycování, ruční laminování pod fólií, lehké RTM)
3. Vady kompozitních materiálů (zvlnění, pórovitost, bubliny, suchá místa, delaminace a jiné)
4. Uhlíkové vlákna a jejich význam pro průmyslové aplikace
5. Experimentální část
6. Návrh kompozitní aplikace vhodné pro vakuové prosycování
7. Experimentální zkoumání infuzních procesů (tloušťka, plošná hmotnost, směr plnění atd.)
8. Experimentální testování vyrobených těles a jejich vyhodnocení
9. Závěr diplomové práce a diskuze dosažených výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2017

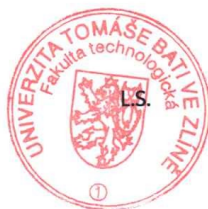
Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 21. února 2017



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



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

Příjmení a jméno: BAMBUCH MARTIN

Obor: VÝROBNÍ
INŽENÝRSTVÍ

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, považuji 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 10.5.2017



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 nevdělečně 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

Tato diplomová práce se zabývá výrobou zkušebních prototypů (plněných kompozitních systémů) pomocí vakuové infuze, optimalizací a testováním vzorků na vybraných typech zkoušek.

Práce se skládá ze dvou částí. V teoretické části jsou vysvětleny základní definice matrice, vláken a jejich význam pro kompozitní materiály. Dále jsou v práci popsány výrobní technologie pomocí vakuové infuze, jejich vlastnosti a současné využití ve světě. Samostatná část je věnována popisu způsobu deformací a vad, které mohou vzniknout při výrobě.

Praktická část se zabývá vhodnou volbou aplikace pro vakuové prosycování, popisem výroby, sledováním infuzních procesů a testováním nařezaných vzorků. Na závěr je provedeno zhodnocení a diskuze výsledků nad získanými daty a návrhy.

Klíčová slova: Vakuová technologie, infuze, vlákno, plnivo, deformace, aplikace

ABSTRACT

This diploma thesis deals with a suitable production of trial prototypes (filled with composite systems) with the assistance of vacuum infusion, optimization and examination of samples on selected types of tests.

The thesis is divided into two parts – theoretical and practical one. The basic definition of matrix, fibres and their importance for composite materials are described in the theoretical part. Furthermore, the production technology using vacuum infusion, their properties and current applications in the world are described. A separate section is devoted to kinds of deformations and defects, which could emerge during production.

The practical part engages in an appropriate application for vacuum suction, description of production, monitoring of infusion processes and testing of cut samples. In conclusion, an assessment and reflection on the obtained data and designs are conducted.

Keywords: Vacuum technology, infusion, fibre, filler, deformation, application

Touto cestou bych rád poděkoval své vedoucí paní Doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D za vstřícnost, ochotu, cenné informace a poskytnutý čas, který mi věnovala při vypracování této diplomové práce. Poděkování patří také mé rodině za jejich trpělivost, podporu a pomoc po celou dobu mého studia.

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ, MATRICE A VLÁKNA	11
1.1 SKELNÁ VLÁKNA.....	13
1.1.1 Skelné vlákna a jejich využití	13
1.1.2 Výroba skelných vláken	13
1.1.3 Úprava skelných vláken	14
1.2 UHLÍKOVÁ VLÁKNA	14
1.2.1 Uhlíkové vlákna a jejich využití	14
1.2.2 Výroba uhlíkové vlákna	15
1.2.3 Aplikace a budoucnost uhlíkových vláken	16
1.3 ARAMIDOVÉ VLÁKNA.....	17
1.3.1 Aramidové vlákna a jejich využití	17
1.3.2 Výroba aramidových vláken:	18
2 VAKUOVÉ TECHNOLOGIE	19
2.1 RUČNÍ LAMINOVÁNÍ S VAKUOVÝM LISOVÁNÍM	19
2.2 TECHNOLOGIE VAKUOVÝCH INFUZÍ.....	20
2.3 LISOVÁNÍ PREPREGU	21
2.4 LEHKÉ RTM.....	22
3 DEFEKTY A VADY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	25
3.1 VZDUCHOVÉ BUBLINY A DUTINY.....	25
3.2 DELAMINACE	26
3.3 PÓROVITOST.....	26
3.4 CIZÍ LÁTKY, NEČISTOTY	27
3.5 NESPOJENÁ VRSTVA (DISBOND).....	27
3.6 VADY VLÁKEN	28
3.7 DEFORMACE SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	28
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	32
5 KOMPOZITNÍ APLIKACE VHODNÉ PRO VAKUOVÉ PROSYCOVÁNÍ	33
6 VÝROBA DESEK A ZKOUMÁNÍ INFÚZNÍCH PROCESŮ	35

6.1	MATERIÁLOVÁ SKLADBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	35
6.2	POSTUP VÝROBY ZKUŠEBNÍCH DESEK.....	37
6.3	VLASTNOSTI A SKLADBA VYROBENÝCH DESEK	41
6.4	ŘEZÁNÍ VZORKŮ.....	42
6.5	SLEDOVÁNÍ INFUZNÍCH PROCESŮ	42
7	EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ VYROBENÝCH TĚLES A JEJICH OPTIMALIZACE	45
7.1	MECHANICKÉ ZKOUŠKY – TAH	45
7.1.1	Výsledné hodnoty tahové zkoušky vzorku č. 1	46
7.1.2	Výsledné hodnoty tahové zkoušky vzorku č. 2.....	47
7.1.3	Výsledné hodnoty tahové zkoušky vzorku č. 3.....	48
7.1.4	Výsledné hodnoty tahové zkoušky vzorku č. 4.....	49
7.2	MECHANICKÉ ZKOUŠKY – OHYB	50
7.2.1	Výsledné hodnoty ohybové zkoušky vzorku č. 1.....	51
7.2.2	Výsledné hodnoty ohybové zkoušky vzorku č. 2.....	52
7.2.3	Výsledné hodnoty ohybové zkoušky vzorku č. 3.....	53
7.2.4	Výsledné hodnoty ohybové zkoušky vzorku č. 4.....	54
7.3	ZKOUŠKA ŽHAVOU SMYČKOU	55
7.3.1	Zkouška hořlavosti žhavou smyčkou dle ČSN EN 60695-2-12	56
7.4	LIMITNÍ KYSLÍKOVÉ ČÍSLO (LIMITING OXYGEN INDEX, LOI).....	59
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ A NAMĚŘENÝCH DAT	61
8.1	VYHODNOCENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY	62
8.2	VYHODNOCENÍ OHYBOVÉ ZKOUŠKY	63
8.3	VYHODNOCENÍ INDEXU HOŘLAVOSTI ŽHAVOU SMYČKOU (GWFI)	64
8.4	VYHODNOCENÍ LIMITNÍHO KYSLÍKOVÉHO ČÍSLA (LOI).....	66
	ZÁVĚR	67
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	69
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM TABULEK.....	75
	SEZNAM PŘÍLOH.....	76

ÚVOD

Vakuové technologie umožňují v dnešní době velmi široké uplatnění a efektivní využití materiálů. S produkty této technologie se můžeme setkat skoro na každém kroku, protože využívání kompozitních materiálů je na vzestupu, jelikož nahrazují standardní kovové stavební prvky v těchto odvětvích (doprava, stavebnictví a strojírenství).

V dopravním průmyslu (nejčastěji auta a vlaky) slouží především jako pohledové dílce (kryty, klapky, nárazníky, obklady atd.). V lodním průmyslu se můžeme setkat s výrobou kajaku, člunů i velkorozměrných plachetnic. Ve stavebnictví se používají např. v telekomunikaci a ve větrných elektrárnách jako lopatky a kryty.

Velkou výhodou součástí vyrobených vakuovou technologií je velká pevnost, ořezuvzdornost, vysoká odolnost vůči fyzikálním i chemickým vlivům, tepelné izolační vlastnosti a možnost vyrábět velkorozměrné výrobky. Nejsou však vhodné pro malé produkty, příliš složité (specifické) tvary a velké série. Všechny technologie, které spadají pod vakuové, jsou náročnější na odbornou a kvalifikovanou vyspělost pracovníků. Nevýhodou pro některé aplikace mohou být vysoké pořizovací náklady (pomocné technologické materiály, infuzní zařízení atd.).

Tato diplomová práce se zabývá návrhem vhodné kompozitní aplikace pro vakuové prosvětlování, výrobou zkušebních prototypů pomocí plněných kompozitních systémů a zkoumáním infuzních procesů (směr plnění, rychlost rozvodu pryskyřice, plošná hmotnost). Zkušební tělíska byla vyrobena pomocí vakuové infuze a následně nařezána na předem dohodnuté rozměry a vyzkoušena na sérii měření pro zjištění mechanických vlastností pomocí zařízení na tah dle ČSN ISO 527-4 a ohyb dle ČSN ISO 178. U zkušebních vzorků byla provedena zkouška hořlavosti: zkouška žhavou / horkou smyčkou dle ČSN EN 60695-2-11, ČSN EN 60695-2-12 a limitní kyslíkové číslo dle ČSN ISO 4589-2, která je u kompozitních systémů vyžadována.

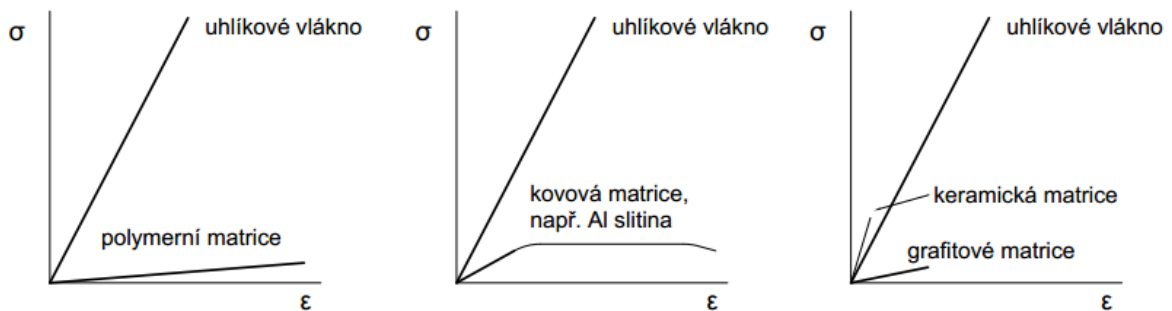
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ, MATRICE A VLÁKNA

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá **výztuž**, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá **matrice**. Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. Ve strojírenství mají největší význam mikrokompozitní materiály, u kterých se největší příčné rozměry výztuže pohybují v rozmezí 10^0 až 10^2 μm . [1]

Matrice:

Hlavní úlohou matrice je spojovat vyztužující fázi a chránit ji před vlivy okolí. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení vláken. Tento požadavek však splňují pouze polymerní a kovové matrice. Keramické, skelné, sklokeramické a uhlíkové matrice mají mezní prodloužení při lomu menší než vlákna. Na (Obr. 1) jsou schematicky znázorněny křivky napětí - poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním uhlíkového vlákna se středními hodnotami modulu pružnosti a pevnosti v tahu viz. (Tab.1). [1]



Obr. 1: Schematické znázornění rozdílů v křivkách napětí - poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním standardního uhlíkového vlákna

Nejsnadněji se kompozity připravují, jestliže matici lze převést do kapalného stavu. K základním charakteristikám kapalného stavu, které ovlivňují technologii přípravy kompozitu, patří povrchová energie - viskozita. Podmínkou dobré smáčivosti výztuže je, aby pro výztuž s vysokou povrchovou energií měla kapalná matrice povrchovou energii co nejmenší. [1]

Výztuže:

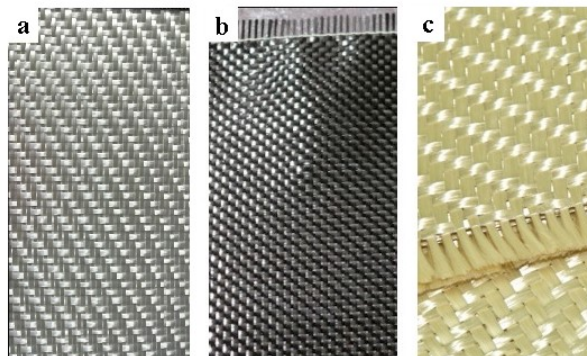
Jsou vlákna, která jsou vždy mnohem pevnější než stejné materiály v kompaktní podobě viz. (Tab. 1). Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty struktury jsou u vláken malých průměru tak malé a navíc příznivě orientované svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. Pevnost vlákna závisí také na jeho délce. Části vzniklé porušením vlákna při tahovém namáhání mají větší pevnost než vlákno původní, protože k prvnímu lomu došlo z největšího defektu vlákna. Většina vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru od 5 do 20 μm . Menší průměry se nepoužívají z technologických důvodů - produkty s velmi tenkými vlákny se obtížně prosycují matricemi. [8]

Tab. 1: Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
skleněné vlákno typu E	73	2500
sklovina E	73	100
uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
polykrystalický grafit	10	20
keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
UHMW polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
lineární polyethylen	0,4	26

Pro kompozity se nejčastěji vyrábějí vlákna:

- Skleněná
- Uhlíková
- Aramidová
- Polymerní
- Keramická
- Kovová



Obr. 2: a) skelné vlákno, b) uhlíkové vlákno, c) aramidové vlákno

1.1 Skelná vlákna

Jsou to tkaniny ze skelné příze typu E. Příze má úpravu (sizing) vhodnou pro většinu běžně používaných pryskyřic. Vzhledem k tomu, že úprava vláken neobsahuje vosk, jsou tkaniny vhodné zejména pro epoxidové pryskyřice, kterou také využijeme v experimentální části. Tkaniny, které jsou upraveny voskem, se sice dobře tkají (lépe kloužou po sobě a vlákna se o sebe nezadržávají), nejsou však pro výrobu laminátů příliš vhodná. [2]

1.1.1 Skelné vlákna a jejich využití

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



Obr. 3: zahradní bazén a ultralehký sportovní letoun s použitím skelných vláken

1.1.2 Výroba skelných vláken

Skelná vlákna se ve světě vyrábějí především ze skloviny označované jako sklo typu E. Základem E skla je soustava oxidů SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , B_2O_3 . Dříve se vlákna vyráběla dvoustupňově, nejprve se ze sklářského kmenu vytvořily tavením při teplotě $1550\text{ }^\circ\text{C}$ kuličky o průměru 10–20 mm, které se dále tavily v platinových kelímcích, ze kterých se vytahovalo vlákno. Nověji jsou v provozu kontinuální technologie, tzn. na jednom konci pece se sází sklářský kmen a na druhém se z platinových vaniček vytahuje vlákno.

Toto vlákno má průměr nejčastěji od 3,5 do 20 μm . Najednou se táhne 51 až 408 vláken. Vytažený pramenec vláken se navíjí na buben. Ještě před samotným navinutím je vlákno, které je samo o sobě velmi abrazivní a lámavé, opatřeno lubrikací a apreturou. Samotná lubrikace je nevhodná, protože by se sice zlepšila manipulovatelnost s vlákny, vlákna by

však měla prakticky nulovou adhezi k polymerní matrici. Proto se již přímo ve výrobě vláken opatřují tzv. apretační vrstvou, která zlepší vazbu mezi vláknem a pryskyřicí. [2]

1.1.3 Úprava skelných vláken

Úprava příze, ze které jsou Aeroglass tkaniny vyráběny, je v podstatě povrchová úprava, která obalí jednotlivá vlákna příze ihned při jejich výrobě tak, že je odolná proti vzdušné vlhkosti. Tato úprava se rozpustí až po prosycení pryskyřicí a díky tomu chrání přízi až do prosycení pryskyřicí. Tkaniny z takto upravené příze se hůře tkají, jelikož neobsahují vosk. Tkají se výrazně pomaleji a občas mohou obsahovat drobný defekt, který však neovlivní jejich užitnou hodnotu ani pevnost výsledného výrobku. [2]

1.2 Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákno (nebo také karbonové vlákno – anglicky “carbon fibre“) je druh vlákna obsahující uhlík v jeho různých modifikacích. Uhlíkové vlákno je dlouhý a tenký pramen materiálu o průměru 5 až 8 μm . Skládá se převážně z atomů uhlíku a je využíváno pro výrobu pevných a odolných tkanin používaných v různých oborech.

Atomy uhlíkového vlákna jsou spojeny v krystaly orientované paralelně k dlouhé ose vlákna. Díky takovému uspořádání mikroskopických krystalů vyniká uhlíkové vlákno na svou velmi malou tloušťku vysokou pevností. [13]

1.2.1 Uhlíkové vlákna a jejich využití

Naprostá většina produkce uhlíkových vláken nachází uplatnění jako výztuž kompozitů. Tato vlákna se také používají v mnoha odvětvích průmyslu, od výroby sportovního nářadí (čluny, golfové hole, části kola, skluznice lyží), až po materiál pro výrobu letadel (trupy a křídla letadel).



Obr. 4: Příklady kompozitních dílů z uhlíkových vláken

1.2.2 Výroba uhlíkové vlákna

Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou tři materiály:

- Celulóza - vyrobená vlákna však mají méně dokonalou strukturu, používají se převážně jako izolační materiál pro vysoké teploty.
- Polyakrylonitril (PAN) - používá se od roku 1980 stále častěji. Vlákna z něj vyrobená jsou považována za standardní vlákna.
- Smola - nákladným způsobem se z ní připravují vlákna, jejichž konečná cena je vzhledem k nízké ceně výchozí suroviny příznivá. Tato vlákna mají velmi vysokou hodnotu E-modulu a velice dobré tepelné a elektrické vlastnosti. Jejich pevnost v tlaku je ve srovnání se standardními vlákny podstatně nižší, protože vazby mezi jednotlivými grafitovými rovinami jsou řidší. Na trhu mají pouze malý podíl. Většina vláken s vysokým modulem pružnosti (HM) a vysokou pevností (HT) se používá pro speciální účely. [3]

Samotná výroba se poté skládá z těchto částí:

Příprava prekurzoru – úprava výchozího materiálu buď tavným zvlákněním, nebo zvlákněním z roztoku. Struktura prekurzoru ovlivní strukturu a pevnost uhlíkových vláken. Uhlíkové vlákno je pak dlužno na požadovanou jemnost.

Stabilizace – před karbonizací je třeba, aby z dlouhých uhlíkových vláken vznikla teplotně stabilní zesítená struktura. Provádí se na vzduchu zahřátím na poměrně nízké teploty 200 – 450 °C na 20 – 30 minut. To způsobí, že uhlíkové vlákno sbírá kyslíkové molekuly ze vzduchu a dojde tak k přerovnění atomové struktury vlákna. Při stabilizaci vzniká ve vláknech také vlastní teplo, které musí být kontrolováno, aby se zabránilo přehřívání. V praxi se někdy používá tažení vlákna skrze řadu zahřívacích komor nebo uhlíkové vlákno prochází přes rozehráté válce a sypané materiály, které odebírají přebytečné teplo.

Karbonizace – jedná se o převod prekurzoru na uhlíková vlákna. Provádí se v inertní atmosféře (obvykle dusíkové), při teplotách mezi 1000 – 2000 °C. Bez přístupu kyslíku uhlíkové vlákno nemůže hořet. Místo toho způsobí vysoká teplota rozkmitání atomů ve vláknech tak, že většina neuhlíkových atomů je odstraněna. Výsledné vlákno obsahuje 85 – 95 % uhlíku.

Grafitizace – nemusí se provádět, ale pokud se provede, vznikají tzv. grafitová vlákna. Provádí se v inertní atmosféře, při teplotách mezi 2400 – 3000 °C. Dochází ke zvýšení obsahu uhlíku na cca 99 % a více. Vzniká také uspořádaná vrstevnatá struktura.

Povrchová úprava – povrch uhlíkového vlákna dobře neváže epoxidy a další látky používané v kompozitních materiálech. Proto se povrch vlákna mírně oxiduje. Přidání kyslíkových atomů na povrch umožňuje lepší přilnavost dalších látek a zhrubnutí povrchu pro lepší mechanické spojení s těmito látkami. Okysličení může být dosaženo přístupem plynů, jako je vzduch, oxid uhličitý, ozon nebo ponořením do různých kapalin, jako chlornanu sodného nebo kyseliny dusičné. Uhlíkové vlákno může být také pokryto ochrannou vrstvou proti poškození při dalším zpracování. [6, 13]

Vlastnosti a některé typy uhlíkových vláken:

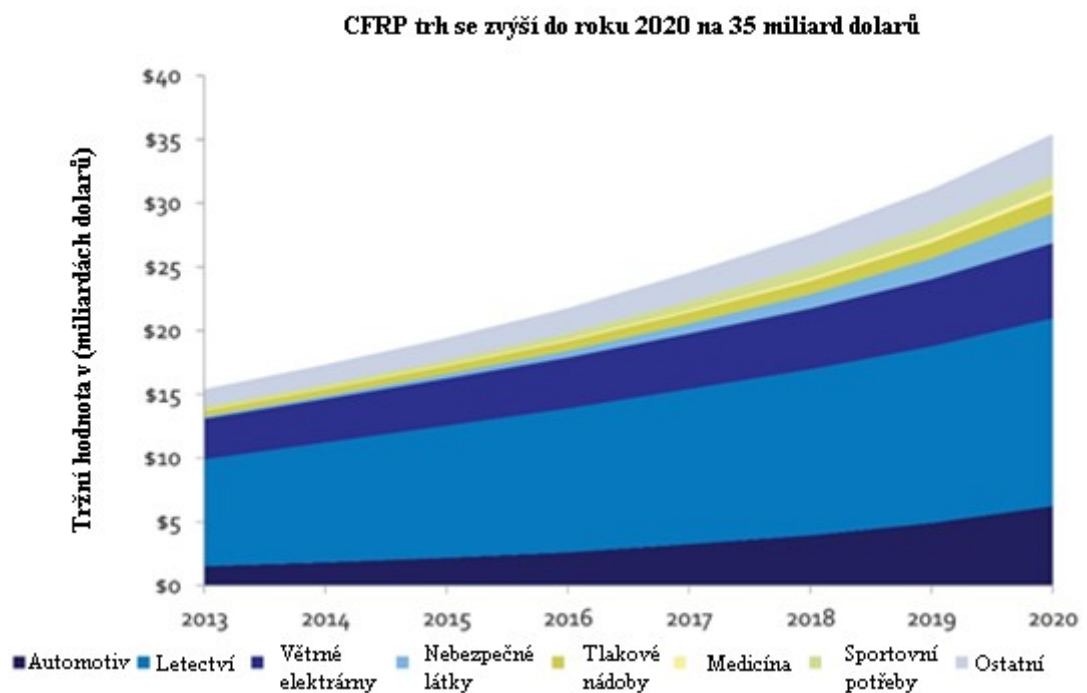
V uhlíkových vláknech se pojí vysoká pevnost, modul pružnosti a tepelná odolnost s nízkou měrnou hmotností. Dnešní uhlíková vlákna mají 60x větší pevnost v tahu než ocel.

- Karbonizovaná vlákna – mají střední modul pružnosti a dobrou pevnost v tahu. Lze je považovat za standardní uhlíková vlákna:
 - HS – “High Strength”
 - AS – “Average Strength”
 - HT nebo HTA – “High Tenacity”
- Vysokomodulová grafitizovaná vlákna:
 - HM – “High Modulus”
- Vlákna vysoce pevná – se středním modulem pružnosti:
 - IM – “Intermediate Modulus”
- Vlákna s vysokým modulem pružnosti:
 - VHM – “Very High Modulus”
 - UHM – “Ultra High Modulus”

1.2.3 Aplikace a budoucnost uhlíkových vláken

Kompozity z uhlíkových vláken (nazývané také uhlíkovými vlákny vyztužených plastů nebo CFRP) nacházejí čím dál tím více cestu do nových aplikací a různých průmyslových odvětví. Poptávka materiálů je rok od roku stále větší a to jen díky velmi dobrým vlastnostem, které byly popsány výše. V průběhu posledních 60 let byly CFRP stále více využívány jako náhrada kovu v aplikacích, protože značně snížily váhu při stejné zachovalém rozměru a tím výrazně snížily např. u letadel spotřebu paliva. [10]

Na obrázku (Obr. 5) můžeme vidět využití uhlíkových vláken, kdy největším představitel je letecký a automobilový průmysl, který však podle předpokladu internetové stránky <http://machinedesign.com/> bude stoupat, ale ne takovým způsobem jako sportovní potřeby, medicína a lodní průmysl, které za období sedmi let (2013 až 2020) stoupnou dvojnásobně. Je tedy patrné, že i nadále se tyto materiály budou ve velkém množství zpracovávat a v současné i budoucí době se člověk bez nich neobejde, protože jsou k nalezení a použití všude kolem nás. [10]



Obr. 5: Produkce uhlíkových vláken

1.3 Aramidové vlákna

Existují dva typy aramidových vláken, meta-aramidová (Nomex) a para-aramidová (Kevlar, Twaron). Vyznačují se malou roztažností, pružností, tepelnou stálostí, odolností proti abrazi a chemické degradaci. Pomalu degradují v expozici UV světla. [2]

1.3.1 Aramidové vlákna a jejich využití

Aramidové tkaniny jsou široce používány zejména pro jejich výjimečné rázové vlastnosti a tahovou pevnost. Jsou výbornou volbou pro vrtulové listy helikoptér, motory raket na tuhá paliva, části brzd a podvozků, vesty chránící proti střelám, boty proti nášlapným minám,

převodové řemeny, optické a telekomunikační kabely, ochranné přilby, různé druhy sportovního vybavení, tlakové nádoby stlačeného zemního plynu a dalších částí, které musejí vydržet vysoká napětí a vibrace. Dále například křídla dopravních letadel Airbus A380 jsou vyztužena vlákny s obchodním označením Kevlar. [2]



Obr. 6: Výrobky z aramidových vláken [19, 20]

1.3.2 Výroba aramidových vláken:

Aramidové vlákno je syntetický organický polymer (aromatický polyamid), vyráběný spřádáním pevného vlákna z roztoku chemické směsi. Základem je složitá chemická látka 1,4-fenylentereftalimid. Aramidová vlákna jsou nejdříve zkroucena do provazců. Pak je z nich tkána hustá, pevně stahovaná tkanina s vnějším vzhledem těžké plachtoviny až pytloviny hnědo-oranžové barvy. Samotná vlákna jsou světle žlutá s vysokou pevností a nízkou hustotou, dávající také vysokou specifickou pevnost. [2]

2 VAKUOVÉ TECHNOLOGIE

Tyto technologie mají široké možnosti uplatnění od stavebnictví po strojírenství a dopravu. Díly vykazují velkou pevnost, otěruvzdornost a tepelné izolační vlastnosti. Nejsou však vhodné pro malé produkty, příliš složité (specifické) tvary a velké série.

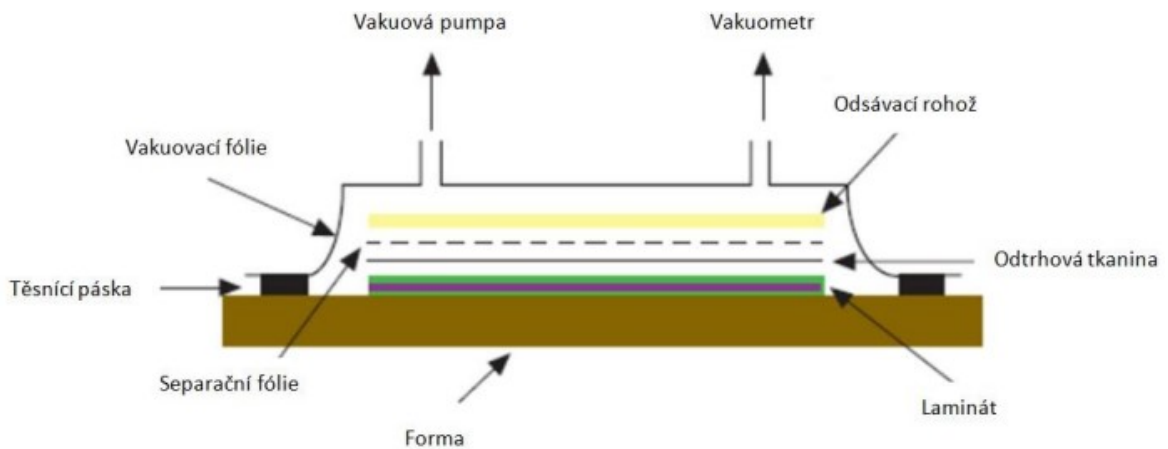
Mezi vakuové technologie pro výrobu kompozitních součástí (dílů) řadíme:

- Ruční laminování s vakuovým lisováním
- Technologie vakuových infuzí
- Lisování prepregu
- Lehké RTM

Všechny tyto technologie jsou náročnější na odbornou a kvalifikovanou vyspělost pracovníků, ale také z hlediska přípravy výroby jsou tyto procesy složitější.

2.1 Ruční laminování s vakuovým lisováním

Pro lisování pomocí vakuovaného vaku se používá podobně jako při ručním kladení nebo stříkání jednodílná forma. Následně se přikryje laminát porézní separační fólií, na kterou se položí hrubá odsávací tkanina a forma se utěsní pomocí fólie a těsnění. Připojením k čerpadlu se celá forma vakuuje. Atmosférický tlak způsobí zhutnění laminátu. Zapojením vakua se laminát zbaví vzduchových bublin. Přebytečná pryskyřice se přitom odvede z odsávací tkaniny i ze žlábků, který je umístěn na obvodu formy. Pomocí dvoudílné formy, utěsněné po obvodu, je možno tímto způsobem vyrábět výlisky s oboustranně hladkým povrchem. [3]



Obr. 7: Ruční laminování s vakuovým lisováním

2.2 Technologie vakuových infuzí

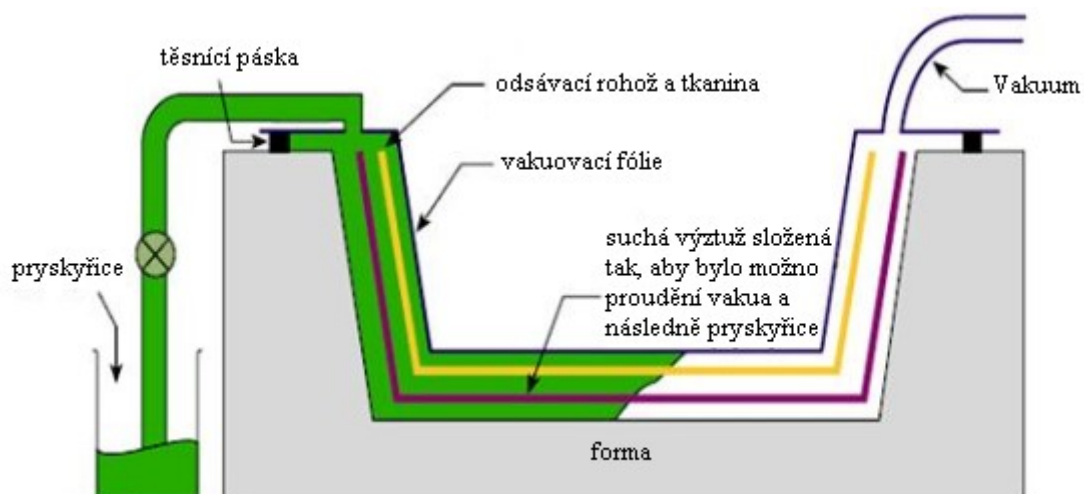
Tyto technologie jsou podobné technologii RTM light, jen s tím rozdílem, že se nepoužívá injektážní zařízení. Rozdělujeme ji na tři modifikace:

Vakuové prosvycování s pružnou vrchní částí formy. Podobně jako u RTM light s odsávacími kanálky. Spodní část formy je tuhá, vrchní část, převážně kompozitní, má určitou pružnost, která reguluje přítlak, uzavírací sílu a prosvycování zajišťuje vakuum 0.6-0.8 bar. Pojivo je přiváděno ze zásobníku nebo se před uzavřením formy zhruba rozprostře na suchou výztuž. Metoda je vhodná pro oboustranně hladké dílce, do kterých mohou být zakomponovány jádrové materiály – pěny nebo voštiny – pro vytvoření sendvičové struktury.

Vakuové prosvycování pod pružnou folií. Tato metoda má dost společného s lisováním pomocí vakua. Spodní část formy je klasického typu jako pro ruční kladení. Druhá část formy není, místo ní se používá pružná folie. Pryskyřice je distribuována do předem vložených suchých výztuží. Vakuová technologie pod pružnou folií využívá podtlak k prosvycení výztuží. Na výztuže se pokládají další potřebné technologické vrstvy jako odtrhová tkanina, distribuční vrstva, rozvodné kanálky, těsnicí pásky a vakuová folie. Vakuum je aplikováno z formy pomocí kanálku, po obvodu je vakuová folie utěsněna těsnicí páskou. [3, 4]

Vakuové prosvycování je používáno u velkorozměrných dílů, jako jsou kapotáže, lopatky větrných elektráren, trupy a paluby lodí.

Výhodou této technologie je vysoká kvalita, vysoká pevnost a výroba velkoplošných výrobků. Nevýhodou naopak složitý proces a potřeba zkušených pracovníků.



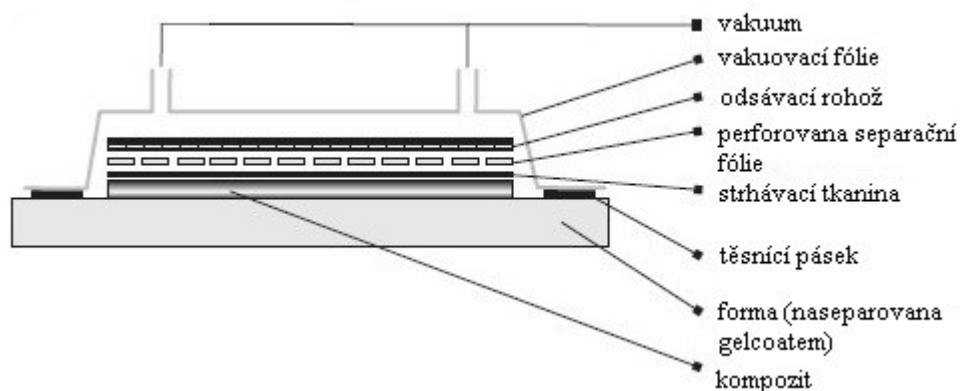
Obr. 8: Technologie vakuového prosvycování pod pružnou folií

Metoda SCRIMP. Je velmi podobná druhé metodě. Rozvod polyesterové nebo vinylesterové pryskyřice zajišťuje hadice a tzv. distribuční médium, které se z povrchu vytvrzeného výrobku sejme (je odděleno od výrobku odtrhovou vrstvou). Krycí fólie zamezuje odpařování reaktivního rozpouštědla (obvykle styren u UP a VE pryskyřice). Mezi nosné vrstvy je možno vložit jádro (pěnové, voštinové) nebo distanční tkaninu. [3, 4]

Tato technologie je vhodná pro výrobu velkoplošných výrobků (chladírenské železniční vagony, čluny a lodě, kontejnery, karosérie autobusů, listy vysokých větrných elektráren).

2.3 Lisování prepregu

Tato technologie využívá už výztuže předimpregnované vhodnými pryskyřicemi tzv. prepregy. Výztuže se podle přesného plánu kladou do dutiny formy ve více vrstvách. Na poslední konstrukční vrstvy se pokládá tzv. odtrhová (strhávací) tkanina ze syntetických vláken, která usnadňuje další operace (laminování, lepení, povrchové úpravy) tím, že jí lze kdykoliv po vytvrzení lehce strhnout a na vzniklém povrchu pokračovat s dalšími operacemi, aniž by bylo třeba povrch odmašťovat, brousit nebo zdrsňovat. Následuje perforovaná separační fólie a odsávací rohož, která vstřebává přebytečné pojivo a zároveň umožňuje odsát vzduchové bubliny vakuem. Nakonec se aplikuje pružná vakuová fólie nebo pryžová plachetka, která se při obvodu formy přilepí těsnícím tmelem ve formě pásku či hmoty nebo oboustrannou lepicí páskou k zajištění funkce vakua. Evakuace vzduchu a přítlak se vyvozuje relativně malým pod tlakem cca 0,3 – 0,9 bar. Poté se všechny materiály ve formě zlisují a celá forma se transportuje do vyhřívací pece nebo autoklávu, protože prepregy vytvrzují při zvýšených teplotách (závisí na druhu použitého prepregu). Formy pro lisování mohou být relativně jednoduché a nákladově nenáročné jako u technologie ručního kladení. [4, 5]



Obr. 9: Technologie lisování prepregu

Výhody:

- vysoký podíl vláknové výztuže
- vysoká kvalita výrobků
- nízký obsah dutin
- vysoká pevnost
- kontrolovaný proces

Nevýhody:

- vysoká cena materiálu
- časově a energeticky náročnější technologie
- poměrně velký odpad
- nutnost skladování při nízkých teplotách
- autokláv nebo vytvrzovací pec
- zařízení pro řezání prepregu

Aplikace:

- letecký průmysl
- automobilový průmysl (doplňky)
- sportovní potřeby (snowboardy, lyže, tenisové rakety)
- železniční průmysl
- vojenský průmysl

2.4 Lehké RTM

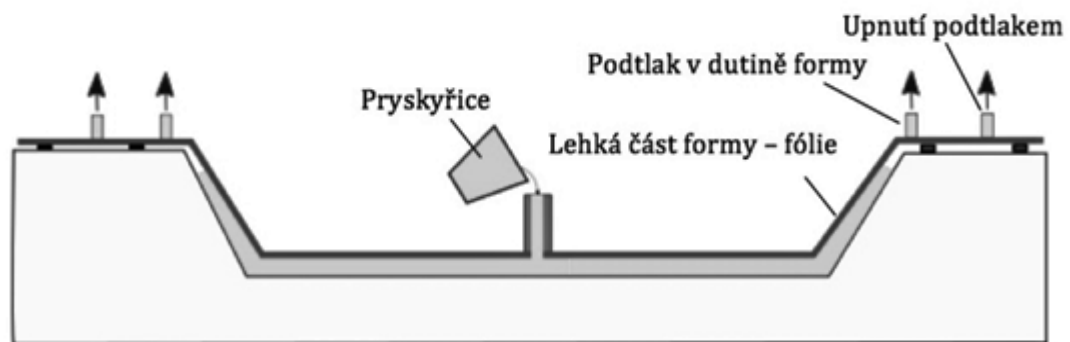
Jedná se o modifikaci klasické technologie RTM, která je v porovnání méně složitější a levnější (odpadají náklady na výrobu jedné poloviny formy). V současné době patří tato uzavřená technologie mezi nejpopulárnější při výrobě kompozitních výrobků.

Technologie výroby:

Samotná technologie (výrobní postup) spočívá v tom, že jedna polovina formy je nahrazena fólií a funkci vstřikovacího tlaku přebírá atmosférický tlak. Nutností pro průběh procesu je vytvoření podtlaku v dutině formy odsávacími ventily na okrajích výrobku.

Při použití lehkého RTM je do spodního dílu formy manuálně kladena sklo-výztuž na případně nanesenou vrstvu gelcoatu a poté je forma uzavřena víkem formy (s také případně nanesenou vrstvou gelcoatu). Následně je uzavřená forma napojena na vývěvu, která vytváří

uvnitř formy podtlak. Zde je výhodou nižší tlak oproti RTM, který se pohybuje v rozmezí 0,4 – 1 baru, proto můžeme konstruovat méně robustní formy a to umožňuje výrobu i větších dílců. Současně se vznikem podtlaku ve formě je do formy injektážním kanálem vstříkována směs pryskyřice, která velice rychle a dokonale vyplňuje vnitřní prostor formy a dokonale prosycuje zmíněnou sklo–výztuž. Pozor by se mělo dávat taky na dobu geltime a tvrdnutí pryskyřice. Máme dvě možnosti umístění vstříkovaní a vakua, a to do středu výrobku, nebo po okraji, tyto dvě možnosti můžeme kombinovat. Tak jako u RTM i zde se jedná o uzavřenou technologii, která omezuje odpar škodlivého styrenu během zpracování a vytvrzovacího procesu. Vzhledem k zpřísnujícím se předpisům na kvalitu pracovního prostředí a snížení emisí do komunálního prostředí nabývají čím dál tím více na důležitosti a rozšíření na úkor ručního kladení a stříkání. Nízkými hodnotami emisí styrenu na pracovišti můžeme tedy zaručit vyšší efektivitu a přilákat kvalifikovanější pracovníky, kteří jsou nezbytně nutní pro výrobní postup a přesné výrobky. [4, 7]



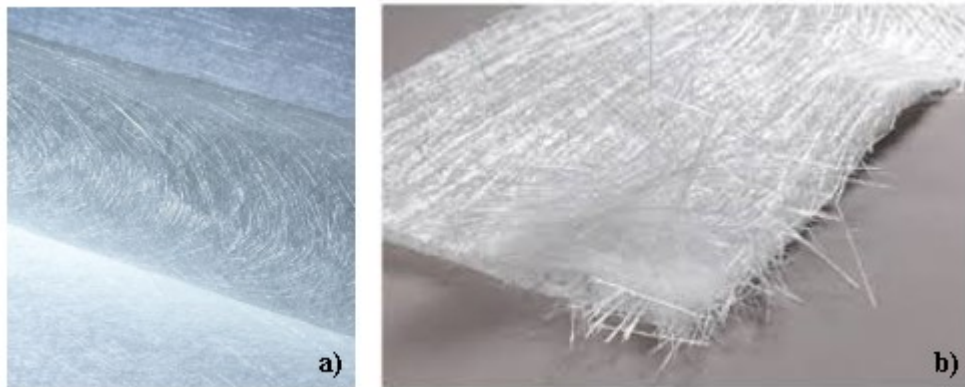
Obr. 10: Princip technologie Light – RTM

Používané materiály:

Při výrobě dílců technologií lehkého RTM využíváme stejné nebo obdobné materiály jako u klasické technologie RTM. Navíc jsou zde k zajištění funkce vakua ve formě používány těsnící profily a pásy.

Výztuže: Rohože z nekonečného vlákna (např. typ Unifilo) nebo prošívané rohože a speciální komplex – skleněná rohož + vnitřní řídká rohož ze syntetických vláken typu Rovicore nebo Combiflow.

Pojiva: Nejčastěji polyesterové pryskyřice se zabudovaným urychlovačem, v řadě případů ve směsi s levnými plnivými (CaCO₃, ATH) pro snížení nákladů a úpravu vlastností, např. snížení hořlavosti a snížení smrštění pro automobilové díly. [4]



Obr. 11: Výztuže a) Unifilo b) Rovicore

Výhody:

- Vysoká produktivita
- Oboustranně hladký povrch

Nevýhody:

- Nižší pevnost výrobku
- Vysoká cena vstřikovacího zařízení
- Vysoká cena forem

Aplikace:

- Nejčastěji automobilový průmysl (nárazníky, boční lemy, spojery, kapoty, podběhy a mnohé jiné)
- Letecký, lodní a lékařský průmysl
- Lze s ní vytvořit i velice rozměrné výrobky jako je trup lodi.

3 DEFEKTY A VADY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

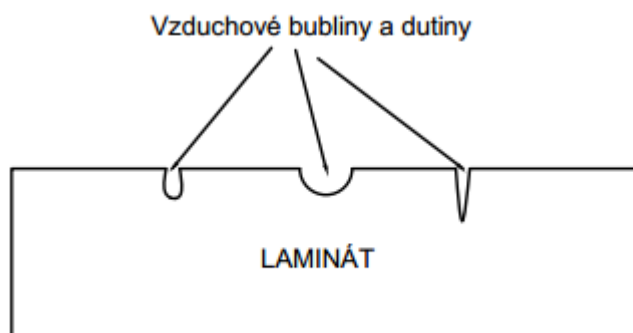
Vady kompozitních materiálů mohou vznikat již při návrhu formy, během výrobního procesu nebo pak v provozu, stárnutím a vlivem prostředí. Vznikají vady a poškození jako jsou dutiny, poréznost, delaminace, trhliny v matrici, lom vláken výztuže a další. Tyto vady (poškození) nemusí být nutně viditelné a snadno detekovatelné, mohou však způsobit značnou degradaci tuhosti a ovlivnit pevnost a mez ztráty stability. [8]

Mezi nejčastější chyby, které mohou vznikat při výrobě, jsou:

- Nesprávný návrh formy, špatně navrhnutá vtoková soustava, resp. odvětrávací otvory
- Volba materiálu
- Nesprávně uložená sklo-výztuž (pohyb výztuže ve formě při vstřikování)
- Nesprávný tlak/podtlak při výrobním procesu
- Špatně nastavený nebo navrhnutý iniciátor reakce

3.1 Vzduchové bubliny a dutiny

Mezi nejčastější možnou složkou ke vzniku vzduchových bublin a dutin patří plynná fáze, která vzniká v kompozitní struktuře. Většinou je tato fáze nežádoucí, jelikož dochází ke snížení mechanických vlastností materiálu a může také způsobit vznik trhlin a následnou delaminaci. Vzduchové bubliny se objevují v matrici při zpracování. Jejich množství je závislé na způsobu výroby a velmi záleží na kvalitě laminování a výrobním procesu, kdy jsou bubliny vytlačovány ze směsi. [9]

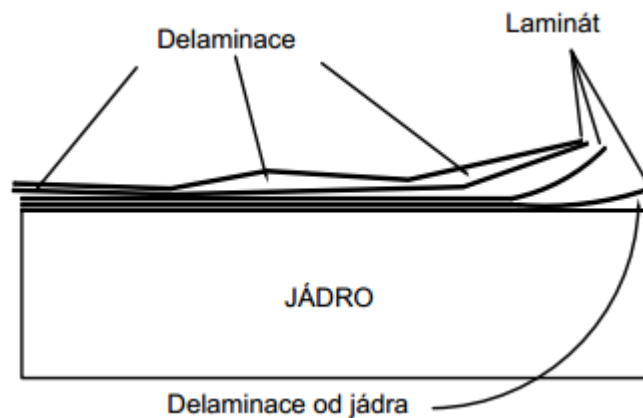


Obr. 12: Vzduchové dutiny na povrchu dílce vzniklé nedostatkem gelcoatu

3.2 Delaminace

Delaminace je rovinná separace vrstvy (nebo vrstev) v důsledku poruchy adheze. Na následujícím obrázku je schematicky znázorněna porucha vrstev.

Tato delaminace vzniká například jako důsledek nedokonalé technologie (vzduchová kapsa, místní přehřátí, špatně položená výztužná vrstva, místo bohatší pryskyřicí) nebo po dopadu předmětu kolmo na vrstvy. [9]



Obr. 13: Delaminace

3.3 Pórovitost

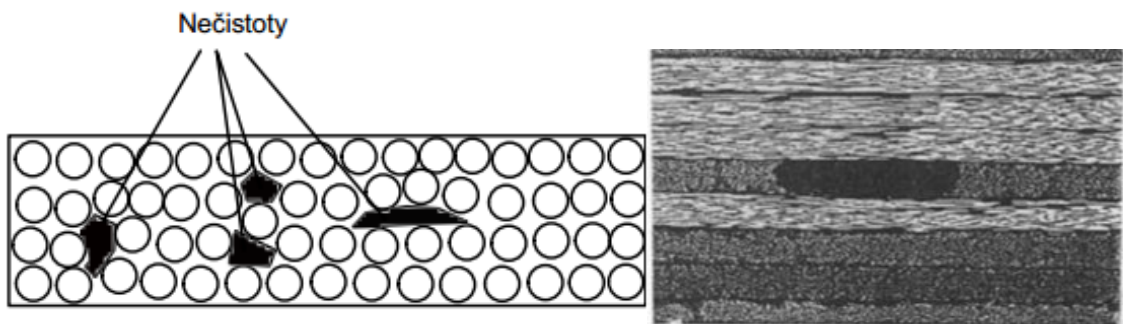
Pórovitost může být popsána jako velké množství mikročastic, z nichž každá je příliš malá na to, aby měla strukturální význam nebo mohla být detekována individuálně realistickou kontrolní technikou. Tyto vady vznikají nejčastěji při ručním kladení během vytvrzovacího cyklu a to vlivem zachycení vzduchu nebo vlhkého prostředí. Pórovitost ovlivňuje mechanické vlastnosti, kdy dochází ke snížení pevnosti v tahu, ohybu stříhu a tlaku v příčném směru. [9]



Obr. 14: Vady v matrici - pórovitost

3.4 Cizí látky, nečistoty

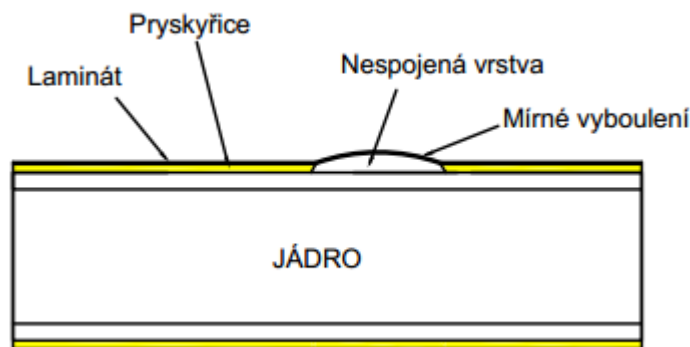
K zahrnutí (vniknutí) nečistot do kompozitní struktury může dojít při výrobě v důsledku cizích látek náhodně obsažených v používaných materiálech během výroby, např. podkladový papír nebo odlupující se vrstva apod. Tyto nežádoucí látky mohou vyvolat degradační účinky na mechanické vlastnosti a mohou způsobit řadu problémů. Nejčastěji se tyto vady vyskytují u ručního kladení, než u moderních zpracovatelských technologií. Cizí látky jsou detekovatelné řadou metod NDE včetně ultrazvukového scanu. Hledají se potenciální místa a body pro vážnější vady jako je delaminace a roztržení. [9]



Obr. 15: Nečistoty v kompozitní struktuře

3.5 Nespojená vrstva (Disbond)

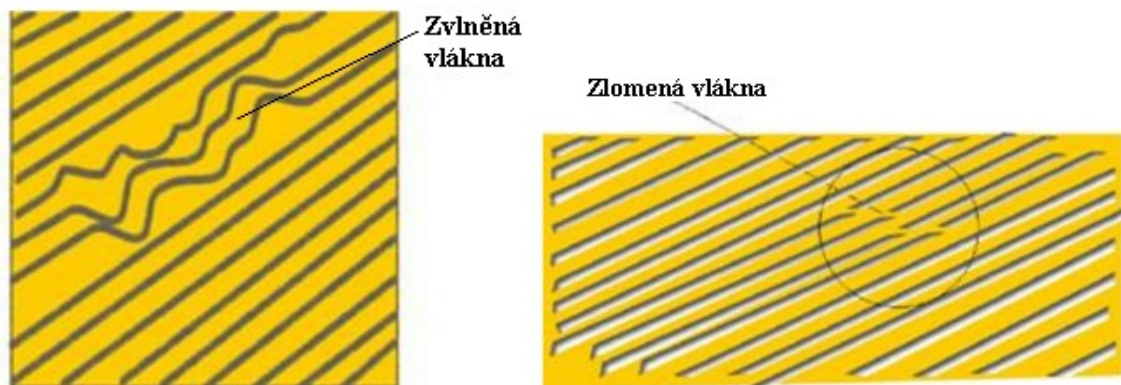
Tento defekt vzniká u kompozitních sendvičových struktur v oblasti spojovaných vrstev (nejčastěji mezi jádrem a vnější vrstvou). Hlavním důsledkem může být špatná přilnavost lepidla k vrstvám, špatně zvolené zatížení např. při lisování nebo poškození při nárazu. Rozptyl vad nemusí být viditelný ihned z vnější strany, pokud jsou vady těsné a slabé, musí se zjistit pomocí některé z metod NDE (ultrazvuk). [9]



Obr. 16: Nespojená vrstva laminátu s jádrem

3.6 Vady vláken

Tyto vady jsou vždy pravděpodobné a mohou být považovány za jednu ze základních vlastností materiálu (vláken). Přítomnost samotných defektů (zlomená vlákna, zvrásnění a zvlnění vláken) je jedním z konečných omezujících faktorů při určování pevnosti a někdy mohou být vadná vlákna identifikovaná jako místa, odkud byl zahájen růst poškození struktury. Tento typ defektů je obzvláště znepokojivý pro letecké a kosmické komponenty s vysokou celistvostí. Pro charakterizaci poškození se používají opět ultrazvukové obrazy a scany. [9]



Obr. 17: Vady vláken

3.7 Deformace sendvičových struktur

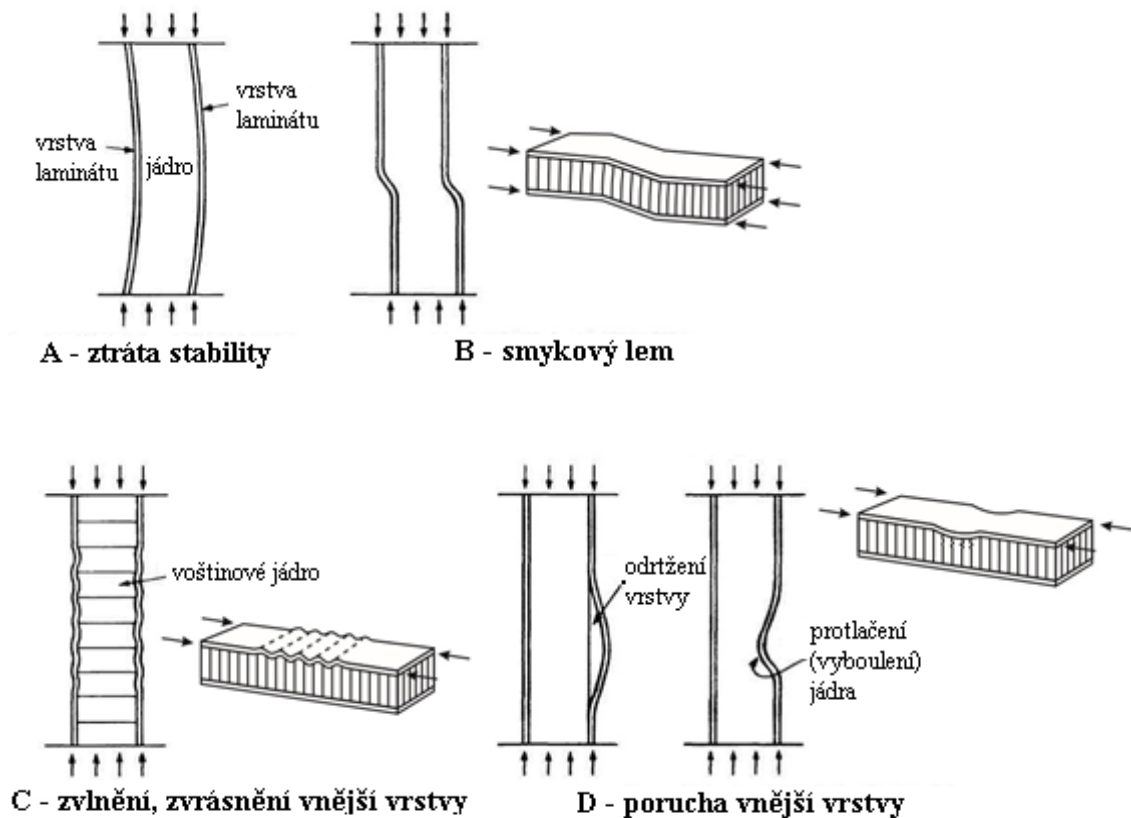
Z dosud provedených experimentů je zřejmé, že u sendvičů zatížených v tlaku se objevuje celá řada různých modů porušení, které můžeme obecně rozdělit do 2 kategorií:

Nestability

- ztráta stability celé struktury – velká délka půlvlny, při velké štíhlosti (Obr. 18: A).
- vytvořením smykového lemu – není lokální porucha, ale forma celkové ztráty stability, kdy délka vlny je velmi malá kvůli nízkému modulu pružnosti ve smyku. Lem se objeví náhle a obvykle způsobí, že se výplň v lemu poruší nebo se usmykne lepidlo (Obr. 18: B).
- zvlnění vnější desky (z angl. wrinkling) - lokální nestabilita, vybočení samotných vnějších vrstev – malá délka půlvlny způsobená nedostatečnou rovinou nebo ohybovou tuhostí a elastickými vlastnostmi jádra. Vnější vrstvy se mohou zdeformovat buďto dovnitř nebo ven, záleží na pevnosti v tlaku výplně vzhledem k napětí v tahu lepidla (Obr. 18: C). [8]

Materiálová porucha

- odtržení vnějších vrstev od výplně a jejich vyboulení = (nedostatečná pevnost lepidla) (Obr. 18: D).
- materiálová porucha vnějších vrstev = (příliš křehký materiál vnější vrstvy a příliš tažný materiál výplně).
- porucha výplně a následné vyboulení vnějších vrstev = (smyková deformace jádra, nedostatečná pevnost a houževnatost). [13]

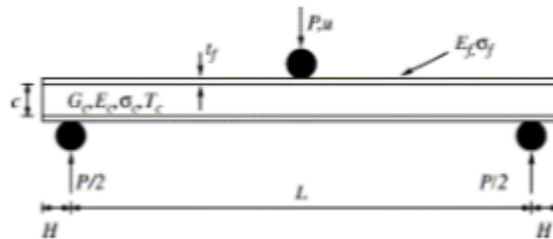


Obr. 18: Deformace sendvičové struktury za působení tlaku [8]

Deformace při ohybu sendvičové struktury:

Při stanovení elastických a pevnostních charakteristik zkouškou ohybem se předpokládá lineární rozdělení normálových napětí po průřezu. Hodnoty pevnosti v ohybu závisí výrazně na poloze vláken vzhledem k neutrální rovině. Zkouška ohybem probíhá při tří nebo čtyřbodovém uložení.

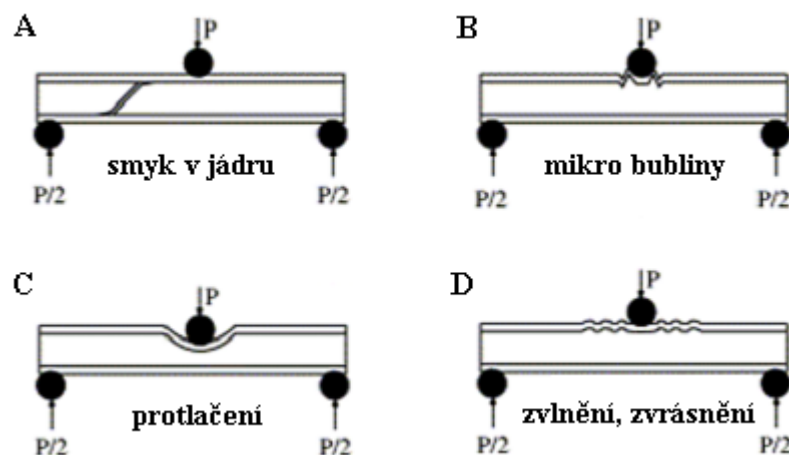
Při zkoušce tříbodovým ohybem (Obr. 19) existuje ve zkušební tělese napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu v bodě zatížení, tj. ve středu délky tělesa. Maximální smykové napětí leží mezi vrstvami uprostřed tloušťky tělesa. [3]



Obr. 19: Tří bodový ohyb [8]

Při ohybu v praxi vznikají následující typy deformací sendvičové konstrukce

- Smyková porucha jádra (Obr. 20: A).
- Microbuckling (objeví se, když axiální napětí na tlačené straně dosáhne kritického napětí, obvykle pod zatěžovacím prvkem) (Obr. 20: B).
- Lokální protlačení (indetance) (Obr. 20: C).
- Zvlnění desky (z angl. wrinkling) krátké vlny na horní desce, můžeme na to pohlížet jako na nosník zatížený axiálním tlakem podepřený elastickým podkladem – jádrem (ztráta stability) (Obr. 20: D). [8]



Obr. 20: Druhy deformací u tří bodového ohybu [8]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části je volba vhodné kompozitní aplikace pro vakuové prosycování, která bude sloužit k výrobě zkušebních desek. Do procesu výroby bude přidáno plnivo (retardér hoření ATH tzv. hydroxid hlinitý) a to o různém množství (0 až 50%). Při výrobě budou sledovány infuzní procesy a vliv množství plniva na výsledné fyzické, chemické a mechanické vlastnosti. Vyrobené prototypy budou dále nařezány na velikost zkušebních tělísek pro jednotlivé zkoušky a následně otestovány na sérii předem dohodnutých testů.

Experimentální část diplomové práce se bude vyrábět v prostorách UVI na UTB ve Zlíně a jedna zkouška bude probíhat ve firmě FORM s.r.o., která se zabývá výrobou kompozitních materiálů, laminátových výrobků a termoplastů.

Hlavní body pro dosažení stanovených cílů práce:

- Volba vhodné technologie
- Materiálová skladba zkušebních vzorků
- Výroba vzorků pomocí vakuové infuze
- Testování mechanických vlastností dle norem: Zkouška ohybových vlastností dle ČSN ISO 178, Zkouška tahových vlastností dle ČSN ISO 527-4
- Zkoušky hořlavosti: zkouška žhavou/horkou smyčkou dle ČSN EN 60695-2-11, ČSN EN 60695-2-12, limitní kyslíkové číslo dle ČSN ISO 4589-2
- Vyhodnocení dosažených výsledků
- Závěr

5 KOMPOZITNÍ APLIKACE VHODNÉ PRO VAKUOVÉ PROSYCOVÁNÍ

Výrobky, které jsou vyrobeny pomocí vakuového prosyčování, mají hned několik výhod. Mezi hlavní patří: tvarová stálost, tuhost, odolnost proti nárazům, vysoká pevnost a zároveň nízká hmotnost výsledného produktu, vysoká odolnost vůči UV záření, fyzikálním a chemickým vlivům. Velkou výhodou metody vakuové infuze je i uzavřený výrobní proces, který je mimořádně šetrný z pohledu ochrany zdraví pracovníků. Tato technologie slouží především k výrobě velkorozměrných a tvarově jednodušších výrobků. Není naopak vhodná pro velkosériovou výrobu, složité (specifické) tvary a malé výrobky.

Vhodnými a také často vyráběnými produkty vakuovou infuzí jsou např. v lodním průmyslu – lodě, kajaky, čluny, ve stavebnictví – lopatky a kryty větrných elektráren a v dopravním průmyslu - obložení, krytky, panely.

Veslice Liteboat:

Pro výrobu nejlehčích rekreačních veslic na světě používá Liteboat inovativní výrobní proces a to technologii vakuové infuze. Veslice Liteboat jsou vyráběny ve Francii z kompozitních materiálů metodou vakuové infuze, která umožňuje výrobu mimořádně pevných a současně velmi lehkých lodí (spotřebovává se malé množství pryskyřice), které si dlouhodobě zachovávají původní vlastnosti. [18]



Obr. 21: Veslice Liteboat

Výroba Liteboat:

Do požadované formy se navrství jednotlivé materiály, uzavře se speciálním materiálem a posléze se pomocí sofistikované technologie napumpuje pryskyřice do materiálu. Tímto způsobem se zaručuje, že bude výrobek souvisle a pravidelně prosycen, bez žádných bublin a vad. Do materiálu se napumpuje přesně takové množství pryskyřice, kolik je potřeba. Výrobek následně necháme vytvrdit (vyschnout) a to buď za pokojové teploty nebo za vysoké teploty ve speciálních pecích.

Výrobní proces veslic Liteboat je ke zhlédnutí zde: <http://www.liteboat.fr/cs/technologie/>

Větrné turbíny:

Vhodnou aplikací pro vakuové prosycování je také výroba větrné turbíny. Zde se zaměřuje především na váhu, protože ocelové a podobné konstrukce by byly pro tuto produkci velmi těžké, nákladné a nepraktické. V případě vakuové infuze jsme schopni vyrábět velmi dlouhá ramena lopatek s mimořádně nízkou hmotností, s požadovanou tuhostí, pevností a odolností proti poškození. Účelem větrné turbíny je přeměnit větrnou energii na elektrickou energii. Při přenášení lopatek vzduchem vzniká v ložiskách a podpěrách tření, které snižuje účinnost turbíny. Pro výrobu lehkých aerodynamických lopatek a ke snížení tření v těchto oblastech se proto používají pokročilé kompozitní materiály a již zmiňovaná technologie pomocí vakuové infuze. [17]



Obr. 22: Větrná turbína

6 VÝROBA DESEK A ZKOUMÁNÍ INFÚZNÍCH PROCESŮ

K výrobě zkušebních vzorků pomocí vakuové infuze byly použity dostupné materiály, které se rovněž využívají v současném výrobním průmyslu. Byla vybrána skelná tkanina AEROGLOSS 200, epoxidový systém LH 210 (pryskyřice) / H 10 (tužidlo) a plnivo ATH (hydroxid hlinitý). Nezbytnou součástí jsou také pomocné materiály, ze kterých se celý systém skládá.

6.1 Materiálová skladba zkušebních vzorků

Skelná tkanina:

Středně hrubá skelná tkanina 198g/m² slouží jako univerzální typ. Často se používá pro první a poslední vrstvy středně velkých laminátů. Je vhodná také jako konstrukční tkanina. Díky své konstrukci se při stříhání netřepí a nevypadávají uvolněná vlákna a je odolná proti defektům při manipulaci a ukládání do forem. S úspěchem se dobře stříhá i v diagonálním směru. Dodává se v plátňové vazbě.

Pryskyřice LH 210:

Jedná se o nízkoviskózní pryskyřici na bázi pryskyřice typu bifenol A, obsahující určité množství bifunkčního reaktivního ředidla. Tato pryskyřice má velmi dobrou odolnost proti krystalizaci za nízkých teplot. Její velmi nízká viskozita umožňuje dobrou manipulaci při aplikacích, zejména při laminování. Vytvrzený systém se vyznačuje vysokou tvrdostí i chemickou odolností a předurčuje tuto pryskyřici k použití pro výrobu kompozitu. Pryskyřice LH 210 je rovněž použitelná jako surovina pro nátěrové systémy a ostatní civilní průmyslová odvětví. Další vlastnosti pryskyřice jsou uvedené v (Tab. 2). Tyto informace jsou poskytovány výrobcem. [P II]

Tab. 2: Vlastnosti pryskyřice LH 210

Chemické a fyzikální vlastnosti	
Viskozita při 25°C	0,7 – 0,9 Pa/s
Měrná hmotnost při 25°C	1,15 kg/l
Epoxidová molární hmotnost	166-182 g
Bod zápalu (PMCC)	149 °C
Teplota vytvrzení	Od 10 °C
Poměr míchání (váhové)	100:45
Doba zpracovatelnosti	30 min.

Tužidlo H 10:

Tužidlo H 10 se používá k vytvrzení epoxidových systémů se zvýšenou UV stabilitou především pro odlévací, laminační, krycí a lepidlové epoxidové systémy. Předností výrobků je excelentní hladkost a dobré povrchové vlastnosti. Toto tužidlo je vhodné pro výrobu laminátů se sklenými tkaninami Porcher nebo Interglass. Další vlastnosti tužidla jsou uvedené v (Tab. 3). Tyto informace jsou poskytovány výrobcem. [P I]

Tab. 3: Vlastnosti Tužidla H 10

Chemické a fyzikální vlastnosti	
Viskozita při 25°C	50 – 150 mPas
Aminový ekvivalent	93 g
Nejnižší zpracování	Při 10 °C
Hustota při 20°C	1.02 ± 0,02 g/cm ³
Doba zpracovatelnosti	15 – 25 min.

Plnivo – retardér hoření ATH (Hydroxid Hlinitý)

ATH patří mezi nejčastěji používané plniva. Získává se z bauxitové horniny, která je směsí oxidů hliníku, železa a dalších prvků. Díky svým vynikajícím fyzikálním vlastnostem má výbornou chemickou odolnost a trvanlivost. Je dostatečně tvrdý, aby zajistil nárazovou odolnost materiálu, ale zároveň měkký, aby mohl být opracováván běžnými nástroji. Čistý je translucenční (průsvitný). ATH je nejen nehořlavý, ale navíc působí jako přirozený retardant hoření. Je hydrát, obsahuje ve své molekule vázanou vodu, která se při hoření uvolňuje ve formě páry. Další vlastnosti hydroxidu hlinitého jsou uvedeny v (Tab. 4). [10]

Tab. 4: Vlastnosti Plniva ATH

Chemické a fyzikální vlastnosti	
Vzhled a vůně	bílý prášek, bez zápachu
Bod varu	100°C
Bod tání	300°C
Rozpustnost ve vodě	Ano
Hustota	2,42g/cm ³
pH	Nerozpustný
Hustota par	slabé základní
Samovznícení	Ne
NFPA hodnocení	Zdraví: 1:Hořlavost: 0, Reaktivita: 0
Stabilita	Za normálních podmínek stabilní
Vzplanutí	Není považován za požár

6.2 Postup výroby zkušebních desek

Jako první bylo zapotřebí si zvolit a přichystat formu tak, aby byl povrch pevný a hladký. Pro náš experiment byla použita velká tabule skla, kterou jsme zbavili nečistot z předešlé výroby kompozitních součástí. Tato forma není určena přímo pro vakuovou infuzi, ale pro výrobu našich desek byla plně dostačující.

Po zbavení nečistot na povrchu formy jsme nanесли na celou plochu skla separační pastu. Tato pasta se nanáší na povrch pomocí hadříku a krouživým pohybem je roztírána po ploše skla. Nanesená vrstva se nechá cca. 3 minuty zaschnout a poté následuje leštění povrchu formy a to pomocí suchých papírových ubrousků. Takto se celý proces minimálně 3x opakuje tak, aby byl povrch co nejvíce čistý a lesklý.

Po vyčištění povrchu formy si nastříháme zvolenou skelnou tkaninu tak, abychom využili co nejvíce prostoru formy, ale aby nám zůstalo ještě dostatek místa na pomocné materiály k vakuové infuzi. V našem případě jsme zvolili velikost skelné tkaniny cca. 600 x 400mm.



Obr. 23: Skelné tkanina Aeroglass 200

V dalším kroku se na skleněnou formu začnou pokládat pomocné materiály. Jako první pokládáme černou oboustrannou lepicí pásku, která je z každé strany cca. o 3 cm větší než jsou rozměry skelné tkaniny. Tato páska slouží k přichycení spirálové hadice, která odvádí přebytečnou pryskyřici z výrobku do rezervoáru přes polyethylenové „T“ kolínko, které je umístěné kdekoliv po obvodu spirálové hadice a je propojeno s plnou hadicí, která vede do rezervoáru.

V další části se již na připravenou skelnou tkaninu pokládá tzv. odtrhová tkanina, která slouží, po vytvrnutí systému, k odstranění všech pomocných materiálu, které byly použity při vakuové infuzi. Pro snadnější odformování je odtrhová tkanina o něco větší než skelná a

to tak, aby nepřesahovala lepicí pásku se spirálovou hadicí, protože by tam mohly v konečném důsledku vzniknout vzduchové bubliny a dutiny. Další vrstvou, která se pokládá přímo na odtrhovou tkaninu je rozvodná síť (nebo-li distribuční médium), která slouží především k rychlejšímu rozvodu pryskyřice po vyráběné ploše. Rozměry rozvodné sítě jsou stejné jako rozměry skelné tkaniny.



Obr. 24: Odtrhová tkanina

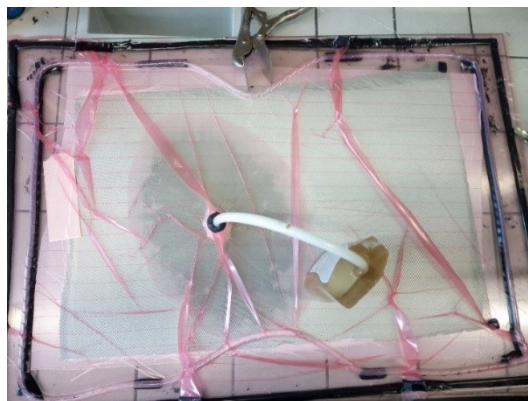
Na konec se pokládá na rozvodnou síť RIC konektor, kterým se do systému přivádí pryskyřice a zároveň nám slouží jako rozváděcí kanál. Poloha tohoto konektoru se volí kdekoliv na vyráběné ploše, nejčastěji však ve středu.

Poslední fází je uzavření formy pomocí vakuové fólie, která musí být bez porušení a trhlin, aby se dosáhlo 100% těsnosti pro vytvoření vakua. Rozměry této fólie musí být dostatečně velké a to o 30-35% větší, než je obvod formy. Vakuová fólie se na formu přilepí pomocí oboustranné lepicí pásky, která je umístěna po obvodu formy. V některých místech vzniknou tzv. ucha, které slouží pro lepší uzavření a těsnění formy. V dalším kroku dojde k utěsnění hadic, které vstupují a vystupují ze systému. Nakonec vyzkoušíme systém nanečisto, pokud někde uniká vzduch, musí být tato příčina odstraněna.



Obr. 25: Uzavření formy a zkouška podtlaku ve formě

Na (Obr. 26) můžeme vidět zjednodušenou technologii vakuové infuze. Přes hadici a rozváděcí kanál se do systému přivádí pryskyřice. Všechny hadice, které vstupují a vystupují ze systému, jsou rovněž utěsněny pomocí oboustranné lepicí pásky. K takto uzavřenému systému připojíme rezervoár, který je napojen na vakuovou pumpu. Pomocí vývěvy dojde uvnitř formy k vysání všeho vzduchu. Zjistíme tak, zda nám tento systém těsní a neuniká nikde vzduch. Pokud by tomu tak bylo, musíme tuto příčinu co nejdříve odstranit a těsnost vyzkoušet znovu. Když je všechno v pořádku a vzduch nikde neuniká, musíme uvnitř formy dosáhnout podtlak min. 0,9 bar. Pokud se podtlak na této hodnotě nebo i větší drží delší dobu, můžeme začít do formy přivádět z nádoby směs pryskyřice. Před přidáním pryskyřice do systému musí být tato složka promíchána s tužidlem popř. s nějakým plnivem. V našem případě se jednalo o plnivo ATH (hydroxid hlinitý). Množství a časy gelace pryskyřice jsou v tabulce (Tab. 7 -11). Prívod pryskyřice zastavíme tehdy, jakmile nám dojde namíchaná směs, která nám musí stačit na prosycení celé formy nebo když pryskyřice začne vnikat do rezervoáru. Ve většině případů se dá obsah potřebné pryskyřice na prosycení výztuže určit z hmotnosti suché výztuže nebo pomocí simulačních programů Polyworx: Resin Transfer Moulding and Vacuum Infusion, a PAM-RTM (Composite Moulding Simulation Software). Důležitým faktorem při vytvrzování je také teplota. Plného vytvrzení se dosáhne až při vyšších teplotách, kterých dosáhneme v teplotních komorách. Teplota se ale nesmí zvýšit nad danou hodnotu pryskyřice, mohly by se totiž zhoršit mechanické vlastnosti výrobku. V našem případě probíhalo vytvrzování za pokojové teploty. Formu jsme odformovali vždy po 24 hodinách. Po odformování se povrch vzorku neopracovával.



Obr. 26: Vakuová infuze

Technologický postup:

Pro výrobu dalších zkušebních prototypů byla technologie výroby stejná, s tím rozdílem, že jsme do směsi pryskyřice a tužidla přidávali určité množství plniva ATH. Proto nebudeme popisovat další výrobní postupy, ale odkážeme se na technologický postup v tabulce (Tab. 5).

Tab. 5: Technologický postup výroby prototypu

1	Příprava formy – vyčištění, nanesení separační pasty, leštění povrchu formy.
2	Nastříhání zvolených materiálů (tkaniny) na požadovaný rozměr a kladení na formu
3	Po obvodu naskládané tkaniny nalepíme lepicí pásku k přichycení spirálové hadice a „T“ kolínka.
4	Pokládáme pomocné materiály – odtrhová tkanina, rozvodná síť, rozvodný kanál, hadice k rezervoáru a pro přívod směsi pryskyřice
5	Uzavření formy pomocí vakuové fólie, vytvoření podtlaku a zkouška těsnosti

6.3 Vlastnosti a skladba vyrobených desek

V (Tab. 6) jsou popsány použité materiály a směsi pro výrobu zkušební prototypů. Tato skladba je pro všechny prototypy stejná. Liší se pouze v hmotnosti sklené tkaniny, použitém množství plniva, umístění rozvodného kanálu a zastavení přítoku pryskyřice. V (Tab. 7 – 11) je uvedeno přehledné složení vyrobených prototypů.

Tab. 6: Použité materiály pro výrobu desek

Skladba vyrobených prototypů	
Materiál tkaniny	Skelná tkanina AEROGLOSS (200g/m ²)
Počet vrstev tkaniny	5
Pryskyřice	Epoxidová LH 210
Tužidlo	H10
Poměr - pryskyřice: tužidlo	100:45
Hmotnost směsi	500g
Technologie	Vakuová infuze

Tab. 7: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 1

Prototyp č. 1	
Hmotnost skelných vláken	272g
Plnivo (Hydroxid hlinitý)	0%
Umístění rozváděcího kanálu	Ve středu desky
Zastavení přítoku pryskyřice	6:29 min

Tab. 8: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 2

Prototyp č. 2	
Hmotnost skelných vláken	265g
Plnivo (Hydroxid hlinitý)	5%
Umístění rozváděcího kanálu	Ve středu desky
Zastavení přítoku pryskyřice	7:38 min

Tab. 9: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 3

Prototyp č. 3	
Hmotnost skelných vláken	263g
Plnivo (Hydroxid hlinitý)	15%
Umístění rozváděcího kanálu	Ze strany desky
Zastavení přítoku pryskyřice	12:19 min

Tab. 10: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 4

Prototyp č. 4	
Hmotnost skelných vláken	270g
Plnivo (Hydroxid hlinitý)	25%
Umístění rozváděcího kanálu	Ze strany desky
Zastavení přítoku pryskyřice	15:29 min

Tab. 11: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 5

Prototyp č. 5	
Hmotnost skelných vláken	269g
Plnivo (Hydroxid hlinitý)	50%
Umístění rozváděcího kanálu	Po obvodu desky
Zastavení přítoku pryskyřice	23:33 min

6.4 Řezání vzorků

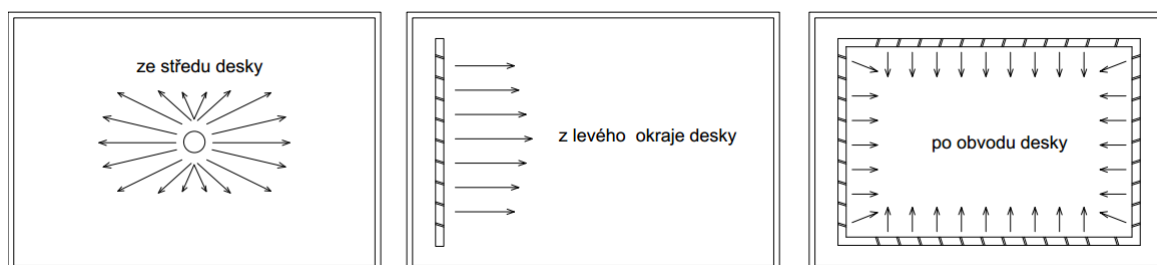
Po výrobě všech kompozitních prototypů, byly dané vzorky před zkoumáním mechanických vlastností a zkoušek hořlavosti nejprve orýsovány a následně nařezány na požadovaný rozměr. Rozměry všech zkušebních vzorků byly zvoleny podle daného typu zkoušky:

- Ohybová zkouška: rozměr 40 x 20 mm
- Tahová zkouška: rozměr 150 x 20 mm
- Zkouška žhavou smyčkou: rozměr 75 x 75 mm
- Kyslíkové číslo: rozměr 150 x 10 mm

Pro řezání vzorků byla použita úhlová bruska s řezacím kotoučem. Nezbytnou součástí byl také příslušný ochranný oděv s přilbou a respirátorem, protože při řezání kompozitních materiálů (zejména skelných vláken) vznikají velmi malé částice, které by mohly proniknout hluboko do plic. Prach se může do těla dostávat i kůží a způsobovat různé kožní problémy a nemoci.

6.5 Sledování infuzních procesů

Při výrobě všech kompozitních prototypů jsme sledovali vliv množství plniva na viskozitu pryskyřice a rychlost rozvodu pryskyřice po výrobku od rozváděcího kanálu. Pro náš experiment jsme také umístili vtoky na 3 různá místa, které můžeme vidět na obrázku (Obr. 27).



Obr. 27: Umístění vtoků při výrobě desek

U prvního i druhého prototypu byl zvolen vtok uprostřed a jako rozváděcí kanál byl použitý RIC konektor. Hadice do rezervoáru byla napojena na pravé straně formy. Množství procent

plniva bylo 0 a 5 %. Na vakuovou fólii jsme si od místa vtoku zaznačili černou fixou body po 80 mm, které pro nás znamenali časové měření, při níž dojde k prosycení skelné tkaniny. Porovnání časových údajů můžeme vidět v tabulce (Tab. 12).

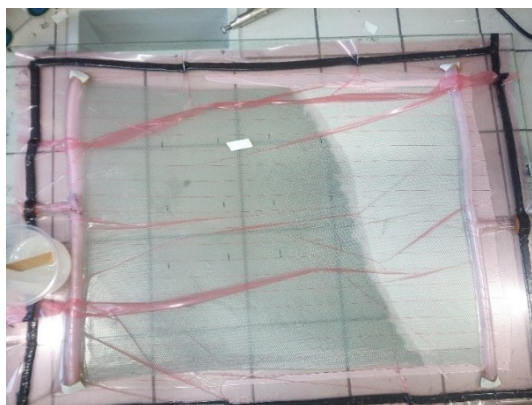
Tab. 12: Časové údaje prototypu č. 1 a 2

Umístnění vtoku: střed			
Vzdálenost od vtoku	80mm	160mm	240mm
Čas prosycení při 0% plniv	0:42 min	2:04 min	4:35 min
Čas prosycení při 5% plniv	0:50 min	2:33min	4:52 min

U prototypu č. 3 a č. 4 byla výroba a měření obdobné jako u prvních dvou vzorků s tím rozdílem, že rozváděcí kanál nebyl umístněný uprostřed, ale na levém okraji vyráběné desky. Jako rozváděcí kanál byla použita spirálová hadice. Hadice byla do rezervoáru umístněná na opačném konci výrobku, než byl vtok do soustavy. Množství procent plniva činil 15 a 25 %. Porovnání časových údajů při jiném umístnění rozváděcího kanálu a vyšším obsahu plniv je vidět v tabulce (Tab. 13).

Tab. 13: Časové údaje prototypu č. 3 a 4

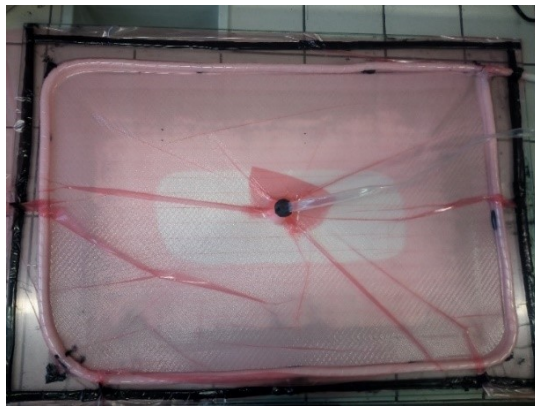
Umístnění vtoku: levá strana desky				
Vzdálenost od vtoku	80mm	160mm	240mm	320mm
Čas prosycení při 15% plniv	1:03 min	2:12 min	3:50 min	6:00 min
Čas prosycení při 25% plniv	1:31 min	2:48 min	4:52 min	7:22 min



Obr. 28: Prosycení tkaniny pryskyřicí a umístnění vtoku na levém okraji desky

U posledního prototypu č. 5 byl rozváděcí kanál (opět spirálová hadice) umístněný po celém obvodu formy. Hadice byla do rezervoáru napojena uprostřed výrobku, k němuž se ale směs pryskyřice skrz malou viskozitu vůbec nedostala (Obr. 29). Rychlost rozvodu pryskyřice zde

dosahovala cca. 10 mm za 2 min. Tento vzorek nebyl nakonec ani použit pro testování, protože při odformování byla vidět nestabilita a praskání vrstev (Obr. 30). Důvodem této vady bylo velké množství obsahu plniva (50%) a nedostatečné prosycení vrstev skrz malou viskozitu a velkou hustotu směsi pryskyřice. Časy zastavení přítoku pryskyřice po prosycení celé vrstvy výrobku jsou pro všechny prototypy uvedeny v tabulkách (Tab. 7-11).



Obr. 29: Prosycení tkaniny pryskyřicí a umístění vtoku po obvodu prototypu



Obr. 30: Vady vyrobeného prototypu č. 5

7 EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ VYROBENÝCH TĚLES A JEJICH OPTIMALIZACE

Všechny vzorky byly rozděleny podle použitého množství plniva a byly podrobeny mechanickým zkouškám a zkouškám hořlavosti. Zjišťování všech těchto vlastností je velmi důležité pro použití kompozitu v praxi. Z každé desky byl nařezán stejný počet kusů pro jednotlivé série testů. Pro mechanické zkoušky po 10 kusech a pro zkoušky hořlavosti po 7 kusech. Rozměry vzorků jsou uvedeny v kapitole (6.4 řezání vzorků).

7.1 Mechanické zkoušky – TAH

Pro testování zkušebních vzorků na tah byl použit univerzální zkušební stroj ZWICK 1456. Technické parametry stroje jsou uvedeny v kapitole 7.2. K tomuto stroji byly následně proti sobě upevněny a seřizeny pneumatické čelisti trhacího zařízení. Zkušební vzorek se rovnoměrně upne mezi čelisti a po zafixování tvaru se začne zatěžovat tahovou silou F , dokud nedojde k přetržení nebo jinému porušení. Tato síla se zaznamenává do programu TestXpert, který je uložen na počítači vedle testovacího zařízení.



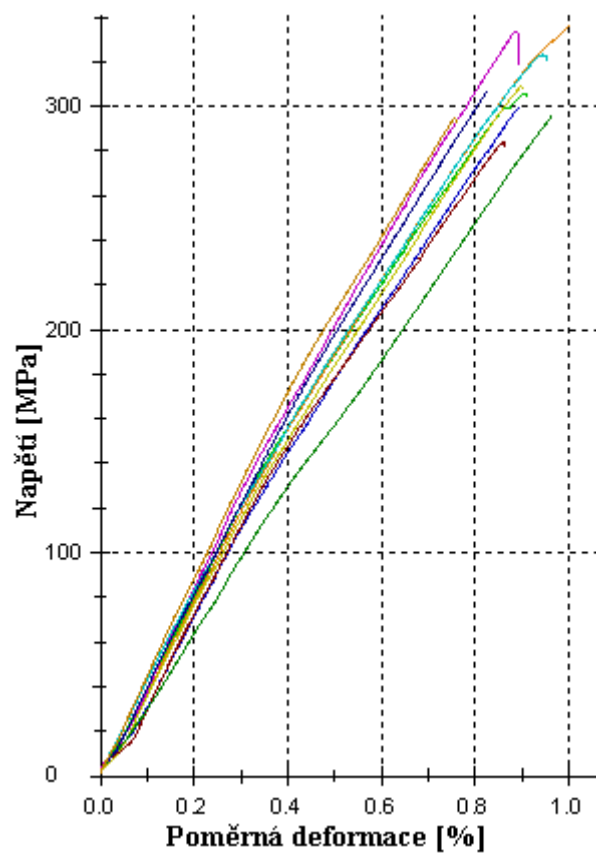
Obr. 31: Zkušební stroj Zwick 1456 s pneumatickými čelisti pro zkoušku na tah

Pro náš experiment byly z naměřených dat použity pouze veličiny vyhodnocující: modul pružnosti v ohybu E [MPa], pevnost v ohybu σ_m [MPa], maximální prodloužení ε [%] a maximální práce W [J].

7.1.1 Výsledné hodnoty tahové zkoušky vzorku č. 1

Tab. 14: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 1

Počet vzorků	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	12000	306	0,8	3313,89
2	12000	300	0,8	3172,08
3	13200	336	1	3548,52
4	13300	334	0,9	3583,12
5	11400	323	0,9	2825,04
6	11900	309	0,9	3453
7	12300	284	0,8	2921,33
8	12000	295	1	3108,09
9	11800	308	0,9	2931,78
10	11600	295	0,8	2610,47
\bar{x}	12150,00	309,00	0,88	3146,73
s	597,08	16,30	0,07	310,45
v	4,91	5,28	8,50	9,87

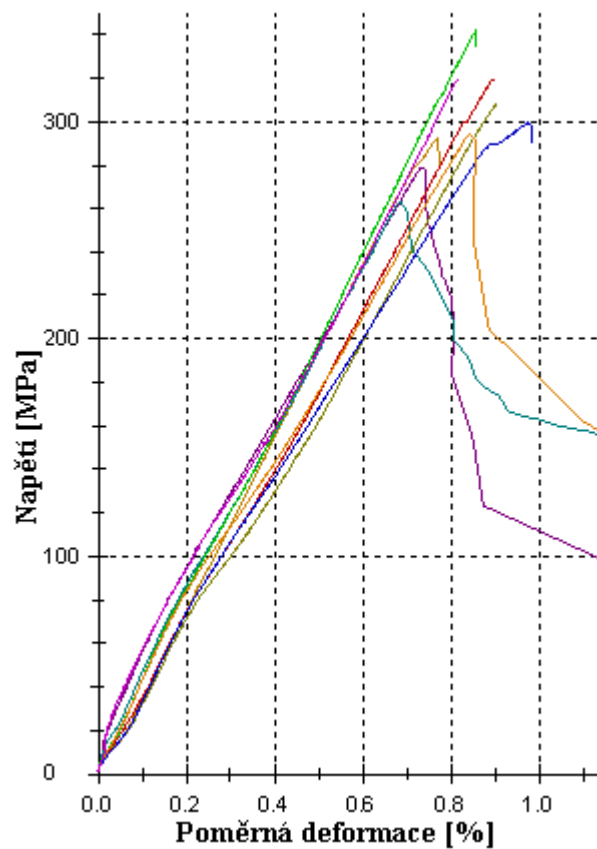


Obr. 32: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 1

7.1.2 Výsledné hodnoty tahové zkoušky vzorku č. 2

Tab. 15: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 2

Počet vzorků	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	11800	292	0,8	2728,07
2	10700	279	0,7	2404,09
3	10500	263	0,7	2371,52
4	12000	308	0,8	2886,05
5	11900	319	0,9	2849,39
6	13400	342	0,9	3400,64
7	11700	299	1	2779,16
8	11200	294	0,8	2759,74
9	12300	319	0,9	3294,75
10	12100	315	0,9	3175,53
\bar{x}	11760,00	303,00	0,84	2864,89
s	787,65	21,44	0,09	325,86
v	6,70	7,08	10,91	11,37

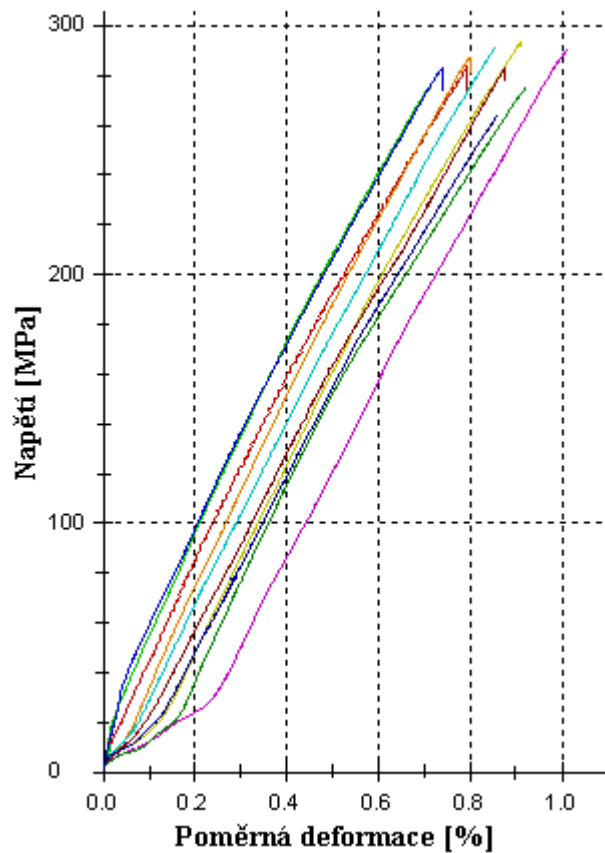


Obr. 33: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 2

7.1.3 Výsledné hodnoty tahové zkoušky vzorku č. 3

Tab. 16: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 3

Počet vzorků	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	11100	284	0,9	2792,71
2	10500	275	0,8	2491,42
3	11300	283	0,9	2824,85
4	11600	287	0,9	2908,49
5	11800	291	0,9	2938,47
6	12000	291	1	2909,02
7	11900	293	0,9	2993,4
8	11200	283	0,9	2990,75
9	10700	275	0,8	2430,46
10	10100	264	0,7	2320,08
\bar{x}	11220,00	282,60	0,87	2759,97
s	601,33	8,56	0,08	237,35
v	5,36	3,03	8,98	8,60

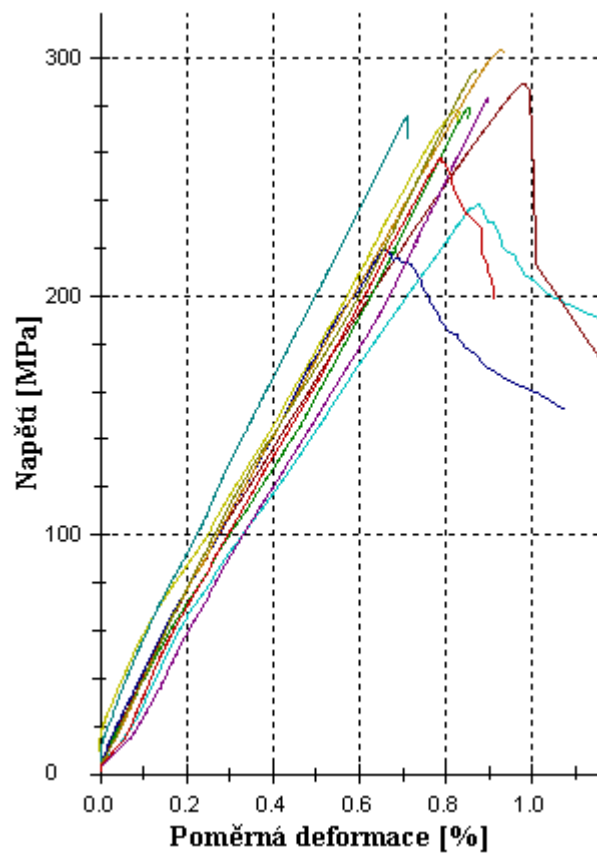


Obr. 34: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 3

7.1.4 Výsledné hodnoty tahové zkoušky vzorku č. 4

Tab. 17: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 4

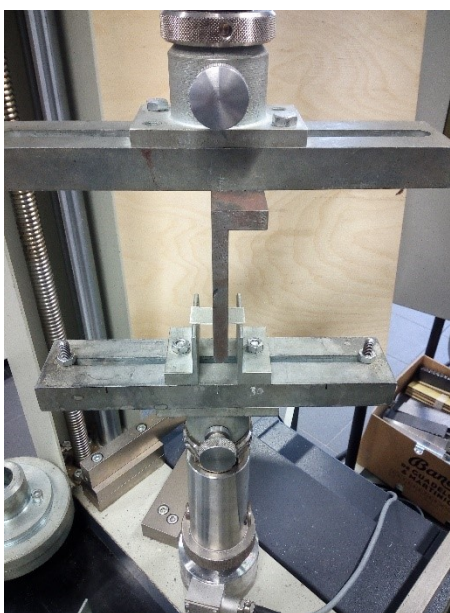
Počet vzorků	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	8950	239	0,9	2163,44
2	9970	278	0,8	2567,29
3	10200	289	0,9	3003,38
4	9950	279	0,8	2501,4
5	8540	220	0,6	1931,62
6	10400	304	0,9	3310,5
7	10400	283	0,9	2455,29
8	10100	275	0,7	2124,64
9	11000	295	1	2859,1
10	10000	258	0,8	2274,22
\bar{x}	9951,00	272,00	0,83	2519,09
s	677,01	24,59	0,11	408,70
v	6,80	9,04	13,25	16,22



Obr. 35: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 4

7.2 Mechanické zkoušky – OHYB

U ohybové zkoušky se jednalo o tzv. třibodový ohyb. Pro zkoušku byl použit stejný zkušební stroj jako na tah, s tím rozdílem, že v dolní části byly pneumatické čelisti nahrazeny dvěma podpěry. V horní části byl upevněn příčník, který směřoval doprostřed mezi dvě podpěry a zatěžoval zkušební vzorky silou F . U testování vzorků poté dochází buď k porušení struktury nebo k trvalé deformaci, což může zapříčinit vyklouznutí z podpěr. Všechny údaje se opět zapisují do počítače, který je uložen vedle testovacího zařízení. Tato metoda patří taktéž mezi statické a vyhodnocuje pevnost v ohybu a modul pružnosti.



Obr. 36: Zkušební stroj Zwick 1456 s podpěry a příčníkem pro zkoušku na ohyb

Podmínky měření:

Teplota okolí: 21°C, Vzdálenost podpor: 30 mm, Rozměr vzorků: 20x40 mm

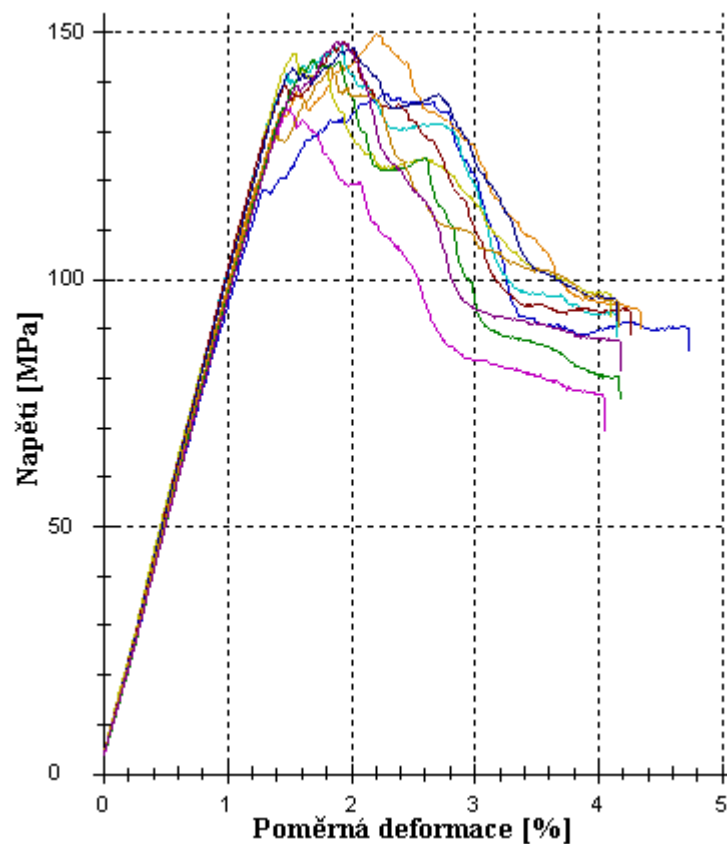
Tab. 18: Technické parametry stroje Zwick 1456

Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 mm
Max. zkušební síla	20 kN
Max. rychlost posuvu příčníku	750 mm.min ⁻¹
Extenzometry měření protažení	macro, přídavný
Vyhodnocovací software	master – tah, standard - ohyb a tlak, standardní hysterezní (cyklické zkoušky)

7.2.1 Výsledné hodnoty ohybové zkoušky vzorku č. 1

Tab. 19: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 1

Počet vzorků	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	8710	138,00	2,10	176,30
2	9480	150,00	2,40	180,11
3	8620	135,00	1,70	144,07
4	9100	147,00	1,90	156,01
5	9310	146,00	2,30	174,82
6	9140	148,00	2,20	172,12
7	8730	144,00	1,90	143,36
8	8970	147,00	2,00	163,72
9	8770	143,00	1,90	143,09
10	8800	148,00	2,10	151,06
\bar{x}	8963,00	144,60	2,05	160,47
s	271,59	4,52	0,20	14,00
v	3,03	3,13	9,82	8,73

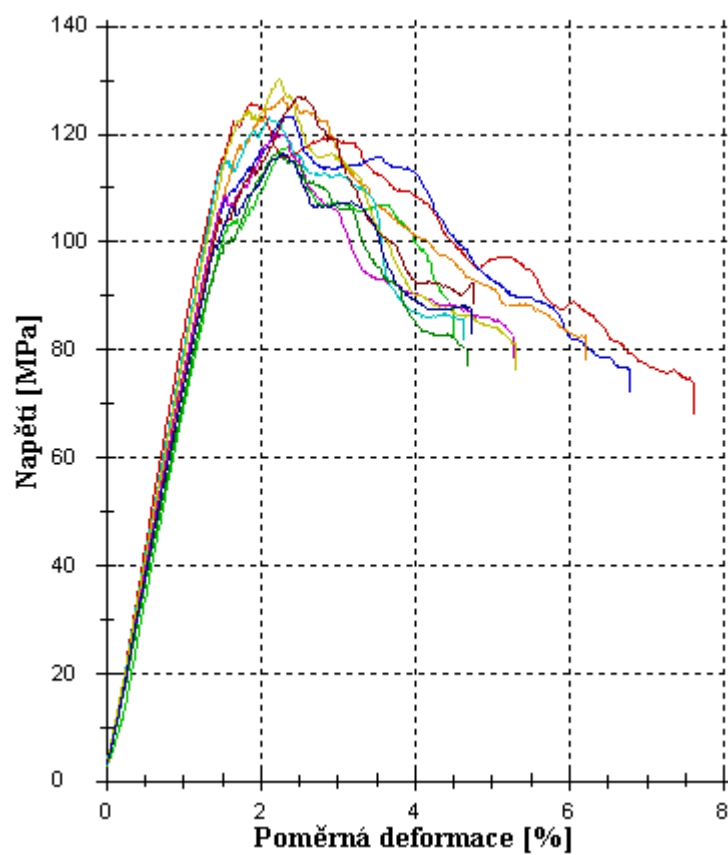


Obr. 37: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 1

7.2.2 Výsledné hodnoty ohybové zkoušky vzorku č. 2

Tab. 20: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 2

Počet vzorků	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	7510	126	1,9	149,21
2	7080	118	1,7	120,98
3	7440	123	2,1	150,62
4	7760	127	2,3	159,91
5	7420	120	1,8	149,82
6	7570	123	2,1	151,28
7	8460	130	2,3	166,38
8	8110	126	2,1	161,46
9	8180	126	2,1	155,19
10	8050	125	2,1	161,66
\bar{x}	7758,00	124,40	2,05	152,65
s	406,44	3,32	0,19	11,98
v	5,24	2,67	9,06	7,85

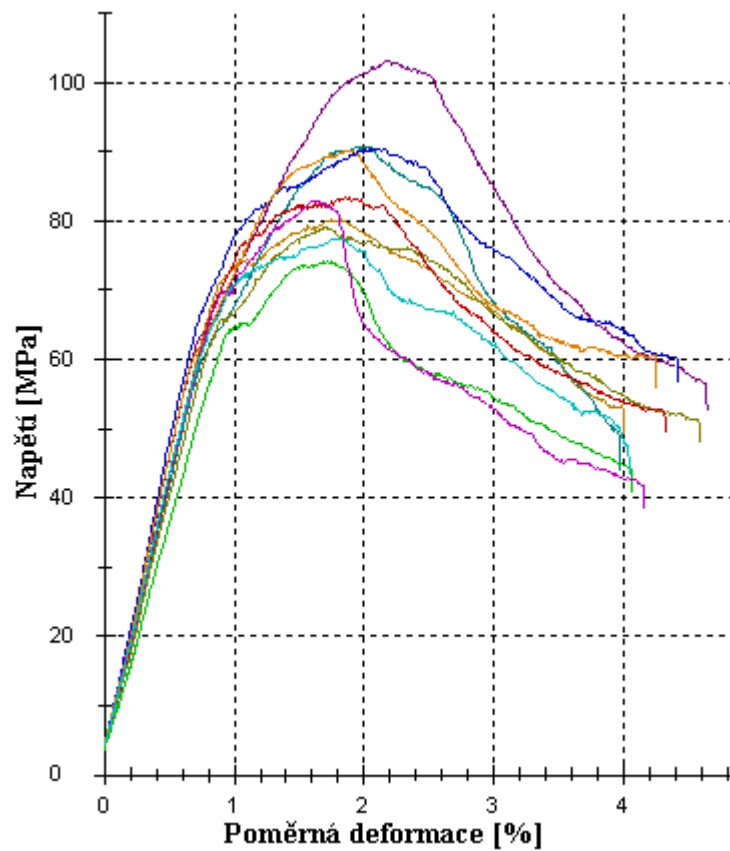


Obr. 38: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 2

7.2.3 Výsledné hodnoty ohybové zkoušky vzorku č. 3

Tab. 21: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 3

Počet vzorků	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	7370	80,4	1,7	83,57
2	8020	103	2,2	124,15
3	7600	90,9	2	100,87
4	6990	79,3	1,7	79,02
5	7300	83,5	1,9	89,15
6	6890	74,2	1,7	78,11
7	7820	91,4	2,1	110,06
8	7230	85,3	1,9	94,19
9	7400	83,1	1,7	83,82
10	7410	87,5	1,9	81,08
\bar{x}	7403,00	85,86	1,88	92,40
s	326,93	7,58	0,17	14,38
v	4,42	8,83	9,15	15,56

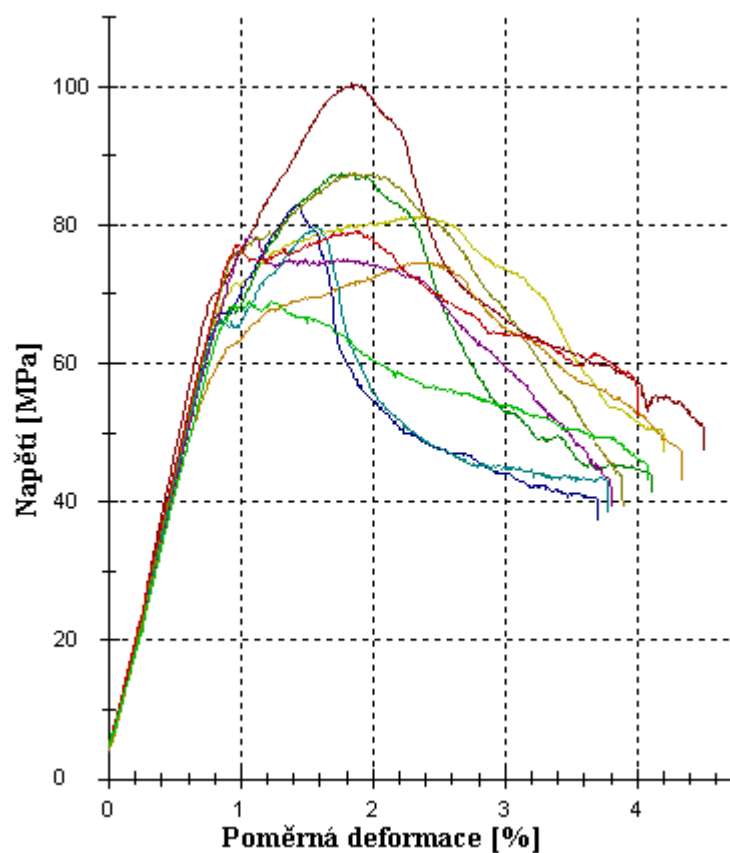


Obr. 39: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 3

7.2.4 Výsledné hodnoty ohybové zkoušky vzorku č. 4

Tab. 22: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 4

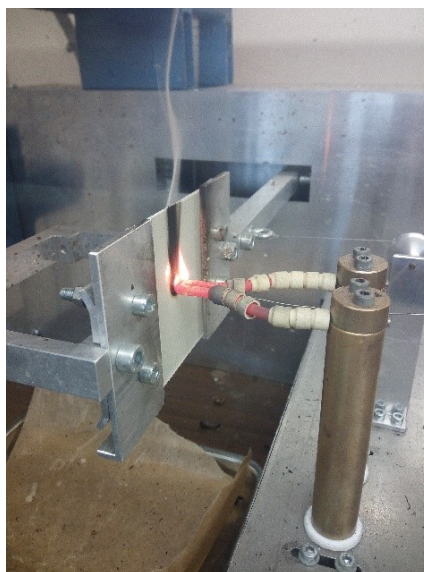
Počet vzorků	E [MPa]	σ_{mf} [MPa]	ε [%]	W [J]
1	7450	81,30	1,90	90,74
2	8130	101,00	2,30	117,34
3	7010	78,50	1,80	83,82
4	7190	82,90	1,70	81,82
5	7300	87,70	2,30	109,40
6	6940	71,70	1,30	47,07
7	7400	79,70	1,60	65,77
8	7260	78,70	1,90	92,65
9	7150	74,20	1,90	89,64
10	6830	68,90	1,30	45,56
\bar{x}	7266,00	80,46	1,80	82,38
s	343,60	8,59	0,33	22,50
v	4,73	10,68	18,26	27,31



Obr. 40: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 4

7.3 Zkouška žhavou smyčkou

Jedná se o požární zkoušku používající bezplamenný zdroj zapálení. Žhavá smyčka je specifická smyčka z odporového drátu, která se elektricky zahřívá na určenou teplotu. Hrot žhavé smyčky se na specifikovanou dobu přivede do kontaktu se zkušební vzorkem a provede se řada pozorování a měření. Výsledek je poté považován za charakteristickou hodnotu patřící do vlastností zkoušeného plastu/kompozitu. Pro zkoušky žhavou smyčkou jsou nejvyšší možné teploty od 550 °C do 960 °C.



Obr. 41: Zkouška žhavou smyčkou

Pozorování a měření:

Zkušební vzorek, okolní části a specifikovaná podložka se pozorují po dobu působení žhavé smyčky t_a a poté ještě po dobu 30 s a zaznamenává se:

- doba t_i , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do zapálení zkušební vzorku nebo specifikované podložky.
- doba t_e , která uplyne od začátku působení hrotu žhavé smyčky do okamžiku, kdy plameny během doby působení nebo po jejím uplynutí uhasnou.
- maximální výška plamenů (zaokrouhlená na nejbližších 5 mm), nebere se však v úvahu počátek zapálení, kdy může na dobu 1 s vzniknout vysoký plamen.
- jestliže tělísko při zkoušce vyhoví proto, že většina plamenně hořícího materiálu se odstraní při oddálení žhavé smyčky, musí se to zaznamenat do protokolu o zkoušce.
- jakékoli zapálení specifikované podložky umístěné pod vzorkem. [14]

7.3.1 Zkouška hořlavosti žhavou smyčkou dle ČSN EN 60695-2-12

Při zkoušce podle ČSN EN 60695-2-12 se zjišťuje index hořlavosti materiálů žhavou smyčkou – GWFI.

GWFI – Glow Wire Flammability Index je nejvyšší zkušební teplota při které během tří po sobě následujících zkoušek vzorku dané tloušťky je splněna jedna z těchto podmínek:

- plameny nebo žhnutí vzorku uhasnou během 30 s po oddálení žhavé smyčky, aniž dojde k zapálení hedvábného balicího papíru umístěného pod vzorkem
- vzorek se nezapálí

GWFI se stanoví jako nejvyšší zkušební teplota, při které jsou ve třech po sobě jdoucích zkouškách splněny tyto podmínky uvedené výše. Jestliže se zkoušený materiál během stanovení GWIT (viz. ČSN 60695-2-13) při nejvyšší teplotě vybrané z tabulky nezapálí, není zapotřebí provádět zkoušku GWFI. Hodnota GWFI pro tento materiál při jeho dané tloušťce bude 960 °C. Značí se takto: *GWFI: 960/3,0* – tělísko o tloušťce 3 mm a zkušební teplotě 960 °C. [14, 15]

Tab. 23: Vyhodnocení zkoušky pro vzorek č. 1- norma ČSN EN 60695-2-12

Norma:	ČSN EN 60695-2-12		Datum zkoušky:		07.04.2017				
Obchodní název:	5 vrstev skelná vlákna + epoxidová pryskyřice LH210		Typ:	Kompozit	Příprava:	Výrobce:			
			Skelná vlákna		Vak. inf.	UTB			
Aklimatizace před zkouškou:	Dřevěná podložka:		Balicí papír:		Zkušební tělísko:				
	ANO		ANO		ANO				
Kalibrace systému měření teploty:	Datum provedení kalibrace:				VYHOVUJE				
Rozměr hrotu A:	4 mm		>90 %		VYHOVUJE				
Zkušební tělísko:	Rozměry:				Tloušťka tělísek:				
	75 x75 mm				1,1 mm				
Materiál:	Číslo:		Barva:	Plněný:	Polyfunkční mon.:				
	1.		Nature	NE	-				
VYHODNOCENÍ									
Ozáření [kGy]	Teplota [°C]	Tělísko [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene	GWFI
			t _i	t _e		Tělísko	Podložka		
0	650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	750	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	850	1	2	>60	NE	ANO	NE	>100 mm	NE
0	800	1	5	>60	NE	ANO	NE	>100 mm	NE
0	775	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	775	2	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	775	3	-	-	ANO	NE	NE	-	775/1,1

Tab. 24: Vyhodnocení zkoušky pro vzorek č. 2 - norma ČSN EN 60695-2-12

Norma:	ČSN EN 60695-2-12		Datum zkoušky:		07.04.2017				
Obchodní název:	5 vrstev skelná vlákna + epoxidová pryskyřice LH210		Typ:	Kompozit	Příprava:	Výrobce:			
			Skelná vlákna		Vak. inf.	UTB			
Aklimatizace před zkouškou:	Dřevěná podložka:		Balící papír:		Zkušební tělíska:				
	ANO		ANO		ANO				
Kalibrace systému měření teploty:	Datum provedení kalibrace:					VYHOVUJE			
Rozměr hrotu A:	4 mm		>90 %		VYHOVUJE				
Zkušební tělíska:	Rozměry:					Tloušťka tělísk:			
	75 x75 mm					1,1 mm			
Materiál:	Číslo:	Barva:	Plněný:	Polyfunkční mon.:					
	2.	Nature	5% ATH	-					
VYHODNOCENÍ									
Ozáření [kGy]	Teplota [°C]	Tělíska [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene	GWFI
			t _i	t _e		Tělíska	Podložka		
0	650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	750	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	850	1	3	>60	NE	ANO	NE	>100 mm	NE
0	825	1	5	>60	NE	ANO	NE	>100 mm	NE
0	800	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	800	2	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	800	3	-	-	ANO	NE	NE	-	800/1,1

Tab. 25: Vyhodnocení zkoušky pro vzorek č. 3 - norma ČSN EN 60695-2-12

Norma:	ČSN EN 60695-2-12		Datum zkoušky:		07.04.2017				
Obchodní název:	5 vrstev skelná vlákna + epoxidová pryskyřice LH210		Typ:	Kompozit	Příprava:	Výrobce:			
			Skelná vlákna		Vak. inf.	UTB			
Aklimatizace před zkouškou:	Dřevěná podložka:		Balící papír:		Zkušební tělíska:				
	ANO		ANO		ANO				
Kalibrace systému měření teploty:	Datum provedení kalibrace:					VYHOVUJE			
Rozměr hrotu A:	4 mm		>90 %		VYHOVUJE				
Zkušební tělíska:	Rozměry:					Tloušťka tělísk:			
	75 x75 mm					1,1 mm			
Materiál:	Číslo:	Barva:	Plněný:	Polyfunkční mon.:					
	3.	Nature	15% ATH	-					
VYHODNOCENÍ									
Ozáření [kGy]	Teplota [°C]	Tělíska [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene	GWFI
			t _i	t _e		Tělíska	Podložka		
0	650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	750	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	850	1	5	>60	NE	ANO	NE	>100 mm	NE
0	825	1	7	>60	NE	ANO	NE	>100 mm	NE
0	800	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	800	2	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	800	3	-	-	ANO	NE	NE	-	800/1,1

Tab. 26: Vyhodnocení zkoušky pro vzorek č. 4 - norma ČSN EN 60695-2-12

Norma:	ČSN EN 60695-2-12		Datum zkoušky:		07.04.2017				
Obchodní název:	5 vrstev skelná vlákna + epoxidová pryskyřice LH210		Typ:	Kompozit	Příprava:	Výrobce:			
			Skelná vlákna		Vak. inf.	UTB			
Aklimatizace před zkouškou:	Dřevěná podložka:		Balící papír:		Zkušební tělíska:				
	ANO		ANO		ANO				
Kalibrace systému měření teploty:	Datum provedení kalibrace:					VYHOVUJE			
Rozměr hrotu A:	4 mm		>90 %		VYHOVUJE				
Zkušební tělíska:	Rozměry:					Tloušťka tělísk:			
	75 x75 mm					1,1 mm			
Materiál:	Číslo:		Barva:	Plněný:	Polyfunkční mon.:				
	3.		Nature	25% ATH	-				
VYHODNOCENÍ									
Ozáření [kGy]	Teplota [°C]	Tělíska [ks]	Časy [s]		Uhasnutí do 30 s	Zapálení		Výška plamene	GWFI
			t _i	t _e		Tělíska	Podložka		
0	650	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	750	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	800	1	-	-	ANO	NE	NE	-	ANO
0	850	1	4	>60	NE	ANO	NE	30mm	NE
0	825	1	10	15	ANO	ANO	NE	10mm	ANO
0	825	2	11	14	ANO	ANO	NE	10mm	ANO
0	825	3	10	17	ANO	ANO	NE	10mm	825/1,1

7.4 Limitní kyslíkové číslo (Limiting Oxygen Index, LOI)

Hořlavost - je schopnost materiálu po zapálení hořet. Při zkoušení hořlavosti plastů / kompozitů nejde jen o vlastní spalování (vzniká světlo a kouř a uvolňují se i velmi jedovaté zplodiny), a proto se většinou přistupuje k jednodušším, i když ne tak vědecky zdůvodněným, zkouškám. Žádná laboratorní metoda však nemůže vystihnout všechny vlivy, které v praxi hoření plastů / kompozitů urychlují. Je třeba vědět, ve kterém průmyslovém oboru se budou dané výrobky používat. Jiné požadavky na hodnocení hořlavosti má elektrotechnika, jiné například stavebnictví. [21]

Retardéry hoření - omezují přístup kyslíku k materiálu a tím brání hoření nebo jej alespoň výrazně zpomalí.

Účinné retardéry hoření:

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| - uhličitan amonný | - slída |
| - hydrogenuhličitan amonný | - síran barnatý a hořečnatý |
| - kyselina boritá | - fosforečnan amonný [21] |

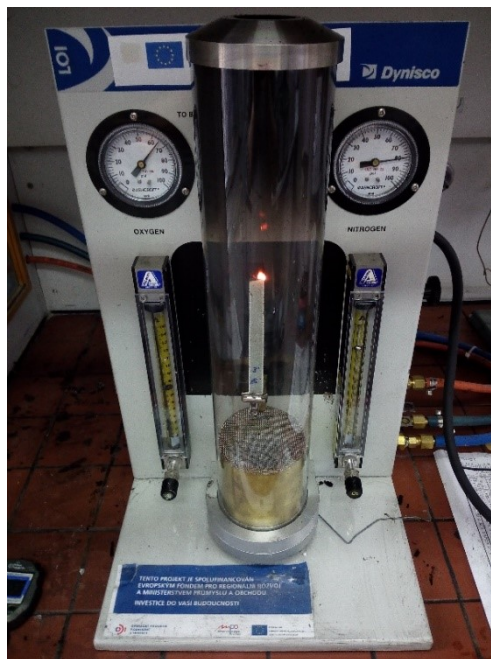
Limitní kyslíkové číslo (LKČ) - udává minimální koncentraci kyslíku v definované směsi dusíku a kyslíku při které vzorek ještě hoří.

Zkušební metoda se zakládá na normě ASTM D-2863 zavedené v USA v roce 1977. Do skleněné trubice přístroje Dynisco (Obr. 42), kterou prochází směs z kyslíku a dusíku, se zavěsí zkušební vzorek a shora podpálí. Koncentraci těchto dvou sloučenin si nastavujeme na stupnicích (žlutě označené), kde na levé straně nalezneme kyslík a na pravé straně dusík. Množství procent volíme podle tabulky (LOI), která je přiložená k tomuto zařízení. Jestliže vzorek hoří déle než 180 s nebo když plamen dosáhne pod určitou značku na trubici, opakuje se zkouška s menší koncentrací kyslíku, čímž se také zmenší kyslíkové číslo a odolnost proti hoření. [16]

Výpočet množství koncentrace je dán podle vzorce:

$$\text{LKČ} = \frac{\text{O}_2}{\text{N}_2 + \text{O}_2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

O₂ značí objem kyslíku a N₂ objem dusíku.



Obr. 42: Zkušební zařízení pro testování LOI

Tab. 27: Hodnoty LOI pro různé materiály

Materiál	LOI
PMMA	17,3
Polyethylen	17,5
Polypropylen	17,5
Polystyren	17,8
Překlížka	23
Nylon 66	24-29
Polyester (GRP)	21-43
PVC (neměkčené)	45-49
Teflon	95+

Rozměry zkušebních těles: 150 x 10 x 1,1 mm

Složení vyrobených vzorků je uvedeno v tabulce (Tab. 10-14).

Tab. 28: Výsledné hodnoty LOI po zkoušce dle ČSN ISO 4589-2

	LOI
Vzorek č. 1	22
Vzorek č. 2	22
Vzorek č. 3	23
Vzorek č. 4	25

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ A NAMĚŘENÝCH DAT

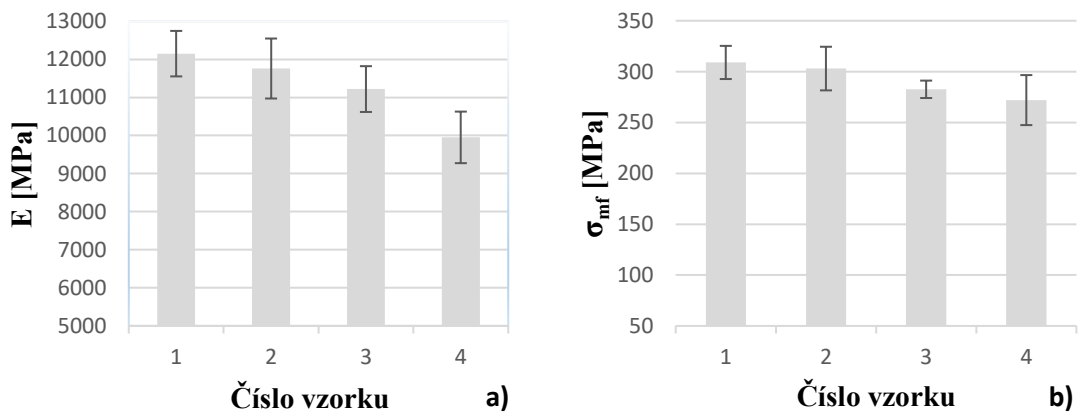
V předchozích kapitolách jsme popisovali materiálovou skladbu a následnou výrobu kompozitních desek. Poté jsme z vyrobených desek nařezali zkušební vzorky, na kterých se provedli mechanické zkoušky na tah a ohyb. Při výrobě bylo do směsi použito plnivo - retardér hoření ATH (Hydroxid hlinitý), proto jsme také otestovali vliv množství plniva na zkouškách hořlavosti, kde měřenými veličinami byly index hořlavosti žhavou smyčkou (GWFI) a limitní kyslíkové číslo (LOI). Všechny výsledky naměřených hodnot byly zaznamenány do tabulek. U mechanických zkoušek se provedly základní statistické funkce (průměr, směrodatná odchylka – s a variační koeficient – v). V této části práce porovnáváme a vyhodnocujeme zkušební vzorky (č. 1 až č. 4) mezi sebou, protože všechny desky byly vyrobeny s rozdílným množstvím plniva.

8.1 Vyhodnocení tahové zkoušky

Pro porovnání zkušebních vzorků jsme vybrali z vypočítaných dat průměrné hodnoty, protože je zde nejvíce vidět, jak se jednotlivé vzorky od sebe liší a jaký vliv má množství plniva na modul pružnosti a mez pevnosti v tahu.

Nejvyšší průměrnou hodnotu modulu pružnosti měl vzorek č. 1 (12150 MPa), který neobsahoval žádné množství plniva. Druhá nejvyšší hodnota byla dosažena u vzorku č. 2 (11760 MPa) s 5 % plniv. Následoval vzorek č. 3 (11220 MPa) s 15 % plniv. Nejnižší hodnotu modulu pružnosti měl vzorek č. 4 (9951 MPa), který obsahoval 25 % plniva. Je tedy patrné, že s přibývajícím množstvím plniva, klesá modul pružnosti v tahu. Všechny hodnoty jsou graficky znázorněny na obrázku (Obr. 43 a)).

U meze pevnosti byly vyhodnoceny konečné výsledky ve stejném pořadí jako u modulu pružnosti. Nejvyšší průměrnou hodnotu meze pevnosti měl vzorek č. 1 (309 MPa), hned za ním zaostává s malým rozdílem vzorek č. 2 (303 MPa). Třetí nejvyšší hodnota byla naměřena u vzorku č. 3 (282,6 MPa). Nejmenší hodnotu meze pevnosti měl jako v předchozím případě vzorek č. 4 (272 MPa). Všechny hodnoty můžeme vidět opět v grafické provedení na obrázku (Obr. 43 b)).

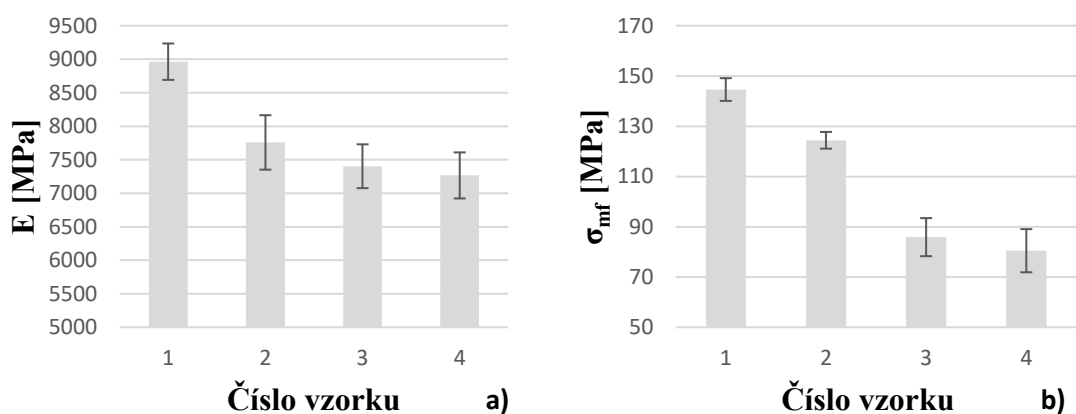


Obr. 43: Průměrné hodnoty po tahové zkoušce a) modul pružnosti b) mez pevnosti

8.2 Vyhodnocení ohybové zkoušky

Zkušební vzorky byly zatěžovány tříbodovým ohybem. Pořadí výsledku zde bylo stejné jako u zkoušky na tah. Nejvyšší hodnotu modulu pružnosti jsme dosáhli u vzorku č. 1 (8963 MPa). Druhá nejvyšší hodnota byla dosažena u vzorku č. 2 (7758 MPa). V dalším pořadí byl vzorek č. 3 (7403 MPa) a jako nejnižší hodnotu modulu pružnosti dosáhl vzorek č. 4 (7226 MPa).

Jako poslední část mechanických zkoušek byla provedena zkouška ohybem pro zjištění meze pevnosti. Pořadí výsledků zůstalo bez změny, a proto nejvyšší dosažená mez pevnosti byla u vzorku č. 1 (144,6 MPa). Druhý vzorek činil (124,4 MPa), třetí (85,86 MPa) a jako nejnižší hodnotu meze pevnosti měl vzorek č. 4 (80,46 MPa). Grafický přehled dosažených hodnot pro ohyb, můžeme vidět na obrázku (Obr. 44).



Obr. 44: Průměrné hodnoty po ohybové zkoušce a) modul pružnosti b) mez pevnosti

Výsledky těchto mechanických zkoušek nám ukázaly, že s přibývajícím množstvím použitého plniva ATH (hydroxidu hlinitého) v směsi pryskyřice, klesá jak modul pružnosti, tak i mez v pevnosti pro tah i ohyb. Nejvyšší hodnoty byly tedy logicky naměřeny u vzorku č. 1, kde nebylo použito žádné množství plniva. Naopak nejhorším výsledkem byl vzorek č. 4, kde bylo použito 25 % plniva.

8.3 Vyhodnocení indexu hořlavosti žhavou smyčkou (GWFI)

U této zkoušky jsme zjišťovali nejvyšší zkušební teplotu, kterou daný vzorek vydrží 3x po sobě s tím, že se vzorek nezapálí, plameny a žhnutí uhasnou do 30 s po oddálení žhavé smyčky a nedojde k zapálení balícího papíru umístěného pod vzorkem. Z průběhu zkoušky byly vyhodnoceny čtyři protokoly, které můžeme vidět v kapitole 7.3 a tabulkách (Tab. 23 až 26).

U sledovaného vzorků č. 1, který neobsahoval žádné plnivo byla první zkouška provedena o nejnižší možné zkušební teplotě a to 650 °C. Materiál splnil všechny kritéria, a proto jsme mohli teplotu navýšit na 750 °C. Zde obstál materiál také. Při dalším navýšení na 850 °C docházelo k zapálení a rozhoření materiálu. Výška plamene dosahovala přes 100 mm a bylo jasné, že materiál neuhasne. Došlo tedy k regulaci teploty na 800 °C, ale způsob vzplanutí a hoření se opakoval, s tím rozdílem, že k zapálení materiálu došlo později. Jako poslední teplota byla použita hodnota 775 °C. Při této teplotě už nedošlo k zapálení a taktéž k žádnému odkapávání apod. Třikrát se tato teplota na testovaných vzorcích opakovala. Byla tedy splněna všechna potřebná kritéria a zapsána hodnota indexu hořlavosti pro vzorek č. 1 **GWFI: 775/1,1**.

U sledovaného vzorku č. 2, který obsahoval 5 % plniva ATH, byl postup zkoumání totožný. Materiál při teplotě 650 a 750 °C jako v předchozím případě obstál. Při dalším navýšení na 850 °C docházelo k hoření vzorku. Výška plamene zde dosahovala také přes 100 mm a bylo potřeba tuto teplotu v dalším vzorku snížit na 800 °C. Vzorek tuto teplotu vydržel a splnil kritéria. V dalším kroku se teplota navýšila na 825 °C, ale tady se už opakoval proces vzplanutí a hoření vzorku vysokým plamenem (přes 100 mm). Přešli jsme tedy opět na nižší teplotu 800 °C, která byla již zkoumána. Zkoumané vzorky při této teplotě třikrát vyhověly a byla tedy splněna všechna potřebná kritéria a zapsána hodnota indexu hořlavosti pro vzorek č. 2 **GWFI: 800/1,1**.

Sledovaný vzorek č. 3 se jevil naprosto stejně jako vzorek č. 2, s tím rozdílem, že množství použitého plniva ATH bylo 15 % a vzorky byly méně ohořené, než u vzorku č. 2 (Obr. 43). Můžeme tedy říct, že při teplotě 800 °C byly splněny všechny potřebné kritéria a byla zapsána hodnota indexu hořlavosti **GWFI: 800/1,1**.

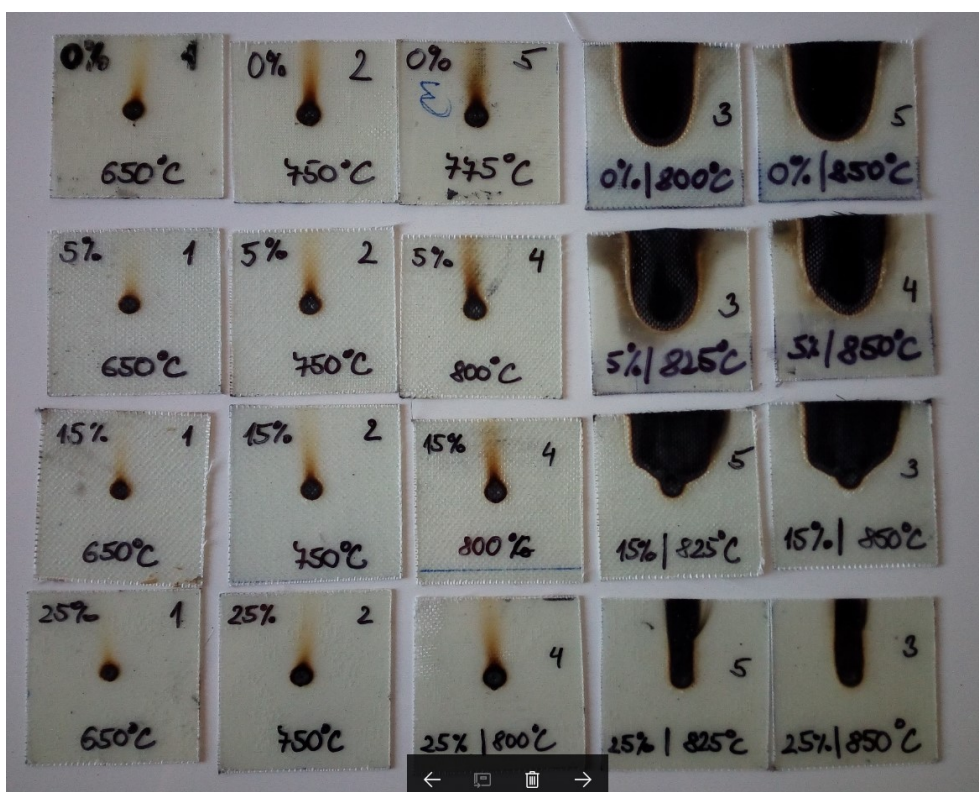
Poslední vzorek č. 4 obsahoval 25 % plniv ATH, což bylo nejvíce v našem experimentu. Vzorky vydržely teplotu 650, 750, 800 i 825 °C. U teploty 825 °C docházelo k hoření vzorku, ale plamen, který byl 10 mm vysoký do 30s po vzdálení žhavé smyčky zhasl, což

bylo pro naši zkoušku vyhovující. Při teplotě 850 °C docházelo již k trvalému hoření. Výška plamene byla 40 mm a způsob ohoření byl jiný, než v předešlých případech viz. (Obr. 43). U vzorku č. 4 splnila všechny kritéria testovaná teplota 825 °C a byla zapsána hodnota indexu hořlavosti **GWFI: 825/1,1**.

Na závěr můžeme tedy říct, že nejvíce odolným vzorkem proti hořlavosti je vzorek č. 4. Tento vzorek obsahuje ve směsi pryskyřice 25 % plniva ATH a po dobu 30 s vydrží nehořet při teplotě 825 °C. Při zkoumaných teplotách, které byly určeny jako hodnota indexu hořlavosti (GWFI) se ze vzorku pouze kouří, ale samotný vzorek nehoří.

Nejméně odolným vzorkem je vzorek č. 1, který neobsahoval žádné množství plniva. Tento vzorek hoří při 775 °C a vykazuje velký plamen.

Ze všech těchto charakteristik lze tedy vyčíst, že zkušební vzorky (materiál) vykazují s větším množstvím použitého plniva ATH větší odolnost proti hoření, jiný způsob ohoření a nižší plameny při hoření.

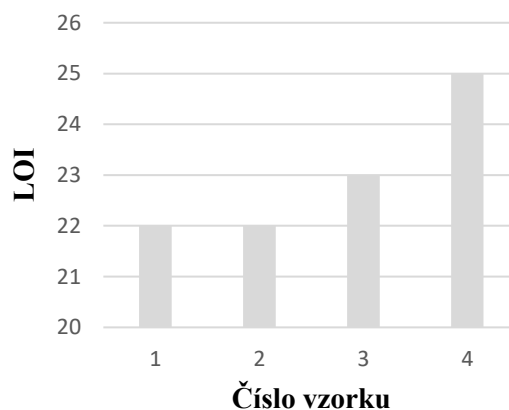


Obr. 45: Vzorky po zkoušce hořlavosti žhavou smyčkou

8.4 Vyhodnocení limitního kyslíkového čísla (LOI)

Výsledky této zkoušky se nachází v číselné stupnici, která usnadňuje srovnávání materiálů. Tato stupnice je uvedena v kapitole 7.4 a tabulce (Tab. 27-28). Z grafického znázornění na (Obr. 46) vyplývá, že množství použitého plniva při výrobě prototypu má vliv na velikost (hodnotu) limitního kyslíkového čísla. Z norem můžeme vyčíst, že čím vyšší je hodnota kyslíkového čísla, tím větší je odolnost materiálu proti vznícení a hoření. Nejvíce odolný proti hoření je tedy vzorek č. 4, který obsahoval 25 % plniva ATH a naopak nejméně odolný proti hoření je vzorek č. 1 a 2.

Za normálně hořlavé se zpravidla považují materiály s LOI do 21. Materiály s LOI vyšším než 27 lze považovat za nehořlavé, naopak vysoce hořlavé materiály mají LOI 15 - 18. Metoda je velmi přesná a reprodukovatelná, protože když nám zkušební vzorek hoří v skleněné trubici po delší dobu než 180 s, musí se koncentrace kyslíku snížit a dusíku zvýšit, tím klesá kyslíkové číslo (LOI). Pokud tomu je naopak, vzorek se buďto vůbec nezapálí nebo hoří méně jako 180 s, tak se koncentrace kyslíku zvýší a dusíku sníží = růst kyslíkového čísla. Limitní kyslíkové číslo tedy vyjadřuje nejnižší koncentraci kyslíku ve směsi s dusíkem v procentech, která ještě stačí na to, aby materiál při podmínkách zkoušky hořel.



Obr. 46: Porovnání hodnot kyslíkového čísla (LOI) pro naše vzorky

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá studiem mechanický vlastností a vlastností hoření materiálu, kdy pro prosycování a vytvrzování kompozitních materiálů pomocí vakuové infuze bylo použito určité množství plniva – retardéru hoření (0 – 50 %) ATH.

Teoretická část se zabývá základní charakteristikou kompozitních materiálů, popisem matrice, vláken a samotným způsobem výroby a využitím těchto materiálů v praxi. V další části jsou vysvětleny výrobní technologie pomocí vakua, které se v dnešní době často používají. Na konci teoretické části jsou popsány defekty a vady kompozitních struktur.

V experimentální části bylo vyrobeno pět desek, které byly následně rozřezány na zkušební vzorky a otestovány na mechanické zkoušky (tah, ohyb) a zkoušky hořlavosti (žhavá smyčka, limitní kyslíkové číslo). Při výrobě byl sledován vliv množství plniva na rychlost rozvodu pryskyřice (viskozitu) po výrobku a vliv umístění vtoku na tři místa (na střed, okraj a po obvodu desky). Na výrobu byla použita skelná tkanina AEROGLOSS 200, epoxidová pryskyřice LH210, tužidlo H10 a plnivo ATH. Výroba, testování mechanických vlastností (tah dle ČSN ISO 527-4, ohyb dle ČSN ISO 178) a zkouška hořlavosti žhavou smyčkou podle ČSN EN 60695-2-11, 60695-2-12 byla provedena v laboratoři mechanických zkoušek fakulty technologické na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně. Zkouška limitního kyslíkového čísla dle ČSN ISO 4589-2 byla provedena ve firmě Form s.r.o. se sídlem ve Střelné.

Z naměřených hodnot vyplývá, že největší modul pružnosti a mez pevnosti v tahu, tak i pro ohyb, byla dosažena u vzorku č. 1, který neobsahoval žádné množství plniva ATH. S postupným zvyšováním množství plniva tyto hodnoty klesaly. Procentuální zhodnocení těchto dat můžeme vidět v tabulce níže.

Tab. 29: Zhodnocení tahové zkoušky

Množství plniva			Definice
5%	15%	25%	
o 3,2%	o 7,65%	o 18%	menší modul pružnosti než u 0% plniva- tah
o 2%	o 8,55%	o 12%	menší mez pevnosti než u 0% plniva - tah
o 13,45%	o 17,40%	o 19,40%	menší modul pružnosti než u 0% plniva - ohyb
o 14%	o 40,5 %	o 44,35%	menší mez pevnosti než u 0% plniva - ohyb

Tyto výsledky nám ukázaly, že dobré mechanické vlastnosti v našem experimentu závisí na množství použitého plniva. S přibývajícím procentem plniva klesá tedy výrazně jak modul

pružnosti, tak i mez pevnosti. Velký vliv na mechanické vlastnosti může mít také teplota pryskyřice při výrobě. V našem případě jsme vyráběly desky při pokojové teplotě 20-22 °C.

Podle výsledků zkoušky limitního kyslíkového čísla (Tab. 28) lze usuzovat, že vzorky s vyšším procentuálním množstvím plniva jsou více odolnější, než vzorky bez plniva. Pro ještě větší LOI, by se muselo toto množství zvýšit a musela by se také změnit technologie výroby, protože s použitím 50 % množství plniva byla viskozita malá. Na obrázku (Obr. 30) můžeme vidět výrazné vady, které zapříčinily to, že jsme nemohli desku nařezat a dále zkoumat pro žádný typ zkoušky.

Z výsledků indexu hořlavosti žhavou smyčkou jsme dopadli podobně jako u LOI. Vzorky s vyšším procentuálním množstvím plniva byly více odolnější a snesly větší teplotu, než vzorky bez plniva. Způsob ohoření zkušebních vzorků byl ale jiný, jak je vidět na (Obr. 43). Největší hodnota indexu hořlavosti byla naměřena u vzorku 4 a to GWFI: 825/1,1.

Vakuová infuze je technologie, která je vhodná pro rozměrné výrobky a pro malosériovou výrobu, protože je potřeba mnoho pomocných materiálů. Důležitou věcí u vakuové infuze je volba vtoku. V našem případě (3 různá místa) neměla volba v toku vliv na výslednou strukturu, protože jsme měli malou rovnou plochu desky, která byla bez lemů, žeber, ostrých hran apod. Daleko důležitějším faktorem byla viskozita pryskyřice, protože se zvyšující viskozitou se samotný proces výroby stává složitější a od určitého stupně plniva i technologicky nemožný. Časový vliv rozvodu pryskyřice s určitým množstvím plniva po výrobku, od jeho spuštění až k zastavení přívodu, můžeme vidět v tabulkách (Tab. 7-11) a následném popisu v kapitole 6.5.

Optimalizace:

Z dosažených výsledků můžeme tedy vyvodit, že množství plniva nám výrazně ovlivňuje viskozitu pryskyřice, mechanické vlastnosti, ale také hořlavost materiálu. Při použití většího množství plniva je zapotřebí zvážit vhodnou volbu technologie nebo zvolit více přívodu směsi do systému. Pro správné dosažení stanovených parametrů ve výrobě a nalezení vhodných kombinací materiálů je pro nás důležité, abychom znali, kde bude výrobek zařazen a k čemu nám bude sloužit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] umi.fs.cvut.cz [online]. [cit. 2016-11-01]. *Kompozitní materiály*. Dostupné z: <http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf>
- [2] havel-composites.com [online]. [cit. 2016-11-11]. *Základní materiály*. Dostupné z: <http://havel-composites.com/ktlgfiles/cz_katalog.pdf>
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] havel-composites.com [online]. [cit. 2016-11-11]. *Technologie*. Dostupné z: <<http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>>
- [5] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. Přednášky a poznámky.
- [6] KOŘÍNEK, Zdeněk [online]. [cit. 2014-11-03]. *Vlákna*. Dostupné z: <<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>
- [7] AUSPERGER, Aleš [online]. [cit. 2016-11-11]. *Technologie zpracování plastů*. Dostupné z: <<https://publi.cz/books/183/18.html>>
- [8] kompozity.info [online]. [cit. 2016-11-18]. *Ztráta stability kompozitu*. Dostupné z: <http://www.kompozity.info/clanky/compdb/ztrata_stability_kompozitu.pdf>
- [9] Prezentace [online]. [cit. 2016-11-18]. *Quality Assurance and Nondestructive Evaluation of Composite Materials*. Dostupné z: <<http://slideplayer.com/slide/3439598/>>
- [10] machinedesign.com [online]. [cit. 2016-11-18]. *Will Carbon Fiber Find Widespread Use in the Automotive Industry*. Dostupné z: <http://machinedesign.com/contributing-technical-experts/will-carbon-fiber-find-widespread-use-automotive-industry>
- [11] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5
- [12] Flame Retardants Integral to Fire Safety . *Flame Retardants*. Dostupné z: <http://www.cefic-efra.com/index.php/en/flame-retardants-en-gb>
- [13] kordcarbon.cz [online]. [cit. 2016-11-02]. *Uhlíkové vlákno*. Dostupné z: <http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno>

- [14] ČSN EN 60695-2-11. *Zkoušky Žhovou/horkou smyčkou : Zkouška hořlavosti konečných výrobků žhovou smyčkou.* [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 11 s.
- [15] ČSN EN 60695-2-12. *Zkoušky Žhovou/horkou smyčkou : Zkouška hořlavosti materiálů žhovou smyčkou.* [s.l.] : [s.n.], Listopad 2001. 9 s
- [16] wikipedia.org [online]. [cit. 2017-02-15]. *Hořlavost textilií.* Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ho%C5%99lavost_textili%C3%AD>
- [17] insights.globalspec.com [online]. [cit. 2017-02-15]. *Industry perspectives.* Dostupné z: <<http://insights.globalspec.com/article/4770/tap-into-the-strength-and-flexibility-of-engineering-composites>>
- [18] liteboat.fr [online]. [cit. 2017-02-15]. *Technologie výroby.* Dostupné z: <<http://www.liteboat.fr/cs/technologie>>
- [19] .fma.hk [online]. [cit. 2017-02-15]. *Helma z aramidu.* Dostupné z: <<http://www.fma.hk/ballistic-aramid-fiber-version-helmet-tb937-p-783.html>>
- [20] sportsmansguide.com [online]. [cit. 2017-02-15]. *Vojenská vesta z kevlaru.* Dostupné z: <<https://www.sportsmansguide.com/product/index/used-german-military-surplus-ballistic-vest-with-kevlar?a=1781302>>
- [21] ksp.tul.cz [online]. [cit. 2017-02-15]. *Hořlavost plastů.* Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/horlavost.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SiC	Karbid křemíku
PAN	Polyakrilnitril
CaCO ₃	Uhličitan vápenatý
SiO ₂	Oxid křemičitý
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
CaO	Oxid vápenatý
MgO	Oxid hořečnatý
B ₂ O ₃	Oxid boritý
ATH	Aluminium trihydrát
RTM	Resin transfer moulding
LRTM	Light resin transfer moulding
CRFP	Carbon fiber reinforced plastic
GWFI	Glow Wire Flammability Index
LKČ	Limitní kyslíkové číslo
LOI	Limiting oxygen index
MPa	Megapascal
mm	Milimetr
cm	Centimetr
μm	Mikrometr
°C	Stupeň Celsia
E	Modul pružnosti
σ	Mez pevnosti
N	Newton
K	Kelvin

kg	Kilogram
g	Gram
s	Sekunda
l	Litr
min	Minuta
Pa	Pascal
J	Joul
W	Watt
%	Procento
ε	Poměrné prodloužení
bar	Vedlejší jednotka tlaku

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Schematické znázornění rozdílů v křivkách napětí - poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním standardního uhlíkového vlákna</i>	11
<i>Obr. 2: a) skelné vlákno, b) uhlíkové vlákno, c) aramidové vlákno</i>	12
<i>Obr. 3: zahradní bazén a ultralehký sportovní letoun s použitím skelných vláken</i>	13
<i>Obr. 4: Příklady kompozitních dílů z uhlíkových vláken</i>	14
<i>Obr. 5: Produkce uhlíkových vláken.....</i>	17
<i>Obr. 6: Výrobky z aramidových vláken [19, 20]</i>	18
<i>Obr. 7: Ruční laminování s vakuovým lisováním</i>	19
<i>Obr. 8: Technologie vakuového prosycování pod pružnou fólií.....</i>	20
<i>Obr. 9: Technologie lisování prepregu.....</i>	21
<i>Obr. 10: Princip technologie Light – RTM.....</i>	23
<i>Obr. 11: Výztuže a) Unifilo b) Rovicore</i>	24
<i>Obr. 12: Vzduchové dutiny na povrchu dílce vzniklé nedostatkem gelcoatu.....</i>	25
<i>Obr. 13: Delaminace</i>	26
<i>Obr. 14: Vady v matrici - pórovitost.....</i>	26
<i>Obr. 15: Nečistoty v kompozitní struktuře</i>	27
<i>Obr. 16: Nespojená vrstva laminátu s jádrem</i>	27
<i>Obr. 17: Vady vláken</i>	28
<i>Obr. 18: Deformace sendvičové struktury za působení tlaku [8]</i>	29
<i>Obr. 19: Tří bodový ohyb [8]</i>	30
<i>Obr. 20: Druhy deformací u tří bodového ohybu [8]</i>	30
<i>Obr. 21: Veslice Liteboat</i>	33
<i>Obr. 22: Větrná turbína</i>	34
<i>Obr. 23: Skelné tkanina Aeroglass 200</i>	37
<i>Obr. 24: Odtrhová tkanina</i>	38
<i>Obr. 25: Uzavření formy a zkouška podtlaku ve formě</i>	38
<i>Obr. 26: Vakuová infuze</i>	39
<i>Obr. 27: Umístnění vtoků při výrobě desek</i>	42
<i>Obr. 28: Prosycení tkaniny pryskyřicí a umístnění vtoku na levém okraji desky</i>	43
<i>Obr. 29: Prosycení tkaniny pryskyřicí a umístnění vtoku po obvodu prototypu</i>	44
<i>Obr. 30: Vady vyrobeného prototypu č. 5</i>	44
<i>Obr. 31: Zkušební stroj Zwick 1456 s pneumatickými čelisti pro zkoušku na tah.....</i>	45

<i>Obr. 32: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 1</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 33: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 2</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 34: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 3</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 35: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 4</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 36: Zkušební stroj Zwick 1456 s podpěry a příčnickem pro zkoušku na ohyb.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 37: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 1</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 38: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 2</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 39: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 3</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 40: Průběh závislosti napětí na deformaci pro vzorek č. 4</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 41: Zkouška žhavou smyčkou</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 42: Zkušební zařízení pro testování LOI</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 43: Průměrné hodnoty po tahové zkoušce a) modul pružnosti b) mez pevnosti.</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 44: Průměrné hodnoty po ohybové zkoušce a) modul pružnosti b) mez pevnosti.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 45: Vzorky po zkoušce hořlavosti žhavou smyčkou</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 46: Porovnání hodnot kyslíkového čísla (LOI) pro naše vzorky</i>	<i>66</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů.....	12
Tab. 2: Vlastnosti pryskyřice LH 210.....	35
Tab. 3: Vlastnosti Tužidla H 10.....	36
Tab. 4: Vlastnosti Plniva ATH	36
Tab. 5: Technologický postup výroby prototypu.....	40
Tab. 6: Použité materiály pro výrobu desek	41
Tab. 7: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 1	41
Tab. 8: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 2	41
Tab. 9: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 3	41
Tab. 10: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 4	41
Tab. 11: Přehled výroby a vlastnosti prototypu č. 5	42
Tab. 12: Časové údaje prototypu č. 1 a 2.....	43
Tab. 13: Časové údaje prototypu č. 3 a 4.....	43
Tab. 14: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 1.....	46
Tab. 15: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 2.....	47
Tab. 16: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 3.....	48
Tab. 17: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 4.....	49
Tab. 18: Technické parametry stroje Zwick 1456	50
Tab. 19: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 1.....	51
Tab. 20: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 2.....	52
Tab. 21: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 3.....	53
Tab. 22: Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vzorek č. 4.....	54
Tab. 23: Vyhodnocení zkoušky pro vzorek č. 1- norma ČSN EN 60695-2-12.....	56
Tab. 24: Vyhodnocení zkoušky pro vzorek č. 2 - norma ČSN EN 60695-2-12.....	57
Tab. 25: Vyhodnocení zkoušky pro vzorek č. 3 - norma ČSN EN 60695-2-12.....	57
Tab. 26: Vyhodnocení zkoušky pro vzorek č. 4 - norma ČSN EN 60695-2-12.....	58
Tab. 27: Hodnoty LOI pro různé materiály	60
Tab. 28: Výsledné hodnoty LOI po zkoušce dle ČSN ISO 4589-2	60
Tab. 29: Zhodnocení tahové zkoušky	67

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI Technický list tužidla H 10

Příloha PII Technický list pryskyřice LH210

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST TUŽIDLA H 10



HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.
Svéslavice 67
783 54 Píslavice
tel.: +420 585 129 011
fax: +420 585 129 040
info@havel-composites.com
www.havel-composites.com
IČ: 25907379
DIČ: CZ25907379

Tužidlo H 10

Technický list, instrukce k použití

Charakteristika:	Tekuté tužidlo do epoxidových pryskyřic na bázi aduktu cykloalifatických aminů.
Aplikace:	Výroba laminátů s požadavkem na čírost Poměry míchání 100:50 LH 130 LH 145 LH 160 LH 210 LH 1000 Zpracovatelnost při 25°C cca 15-25 min.
Procesní teplota:	10-32°C alespoň 3°C nad rosným bodem
Aplikační metody:	Ruční laminace
Speciální vlastnosti:	UV stabilita Extra čírost

Úvod

Tužidlo H 10 se používá k vytvrzení epoxidových systémů se zvýšenou UV stabilitou především pro odlévací, laminační, krycí a lepidlové epoxidové systémy. Zpracování může probíhat nejnižší při 10°C.

Předností výrobků je excelentní hladkost a dobré povrchové vlastnosti.

Vhodné pro výrobu laminátů se sklenými tkaninami Porcher nebo Interglass.

Atesty

Nejsou

Aplikace

Průmyslové podlahy, primery, povrchy, výroba laminátů.

Pro dosažení nejlepších vlastností je vhodné výrobek temperovat, vytvrzení proběhne ale i při teplotě 25°C

Aditiva

Bez plniv

Fyzikální a chemické vlastnosti

Viskozita při 25°C	50-150 mPas (DIN 53 015)
Aminový ekvivalent	93 g
Aminové číslo	250-350 mg KOH/g (DIN 16 945)
Hustota při 20°C	1.02±0,02 g/cm ³ (DIN 53 217 T.4)
Barva (Gardner)	méně než 1 (DIN ISO 4630)

Skladování

Tužidlo H 10 je dodáváno v sudech, nebo menších 30l, 25l, 10l, 5l, 3l, 1l kanystrech. Ideální skladovací podmínky jsou v uzavřeném obalu při konstantní teplotě 20°C mimo sluneční světlo. Při dodržení těchto podmínek je doba skladování max. 6 měsíců.

BOZP

Přečtěte si prosím samostatný podklad – Bezpečnostní list materiálu.

Poznámka pro čtenáře

Společnost Havel Composites CZ s.r.o. (Havel) byla přesvědčena o přesnosti zde uvedených informací v době přípravy tohoto materiálu nebo tyto informace byly převzaty ze zdrojů, o kterých byla společnost přesvědčena, že jsou spolehlivé; uživatel ovšem odpovídá za prostudování ostatních relevantních zdrojů informací a porozumění jim tak, aby dodržoval všechny zákony a postupy aplikovatelné na bezpečnou manipulaci a zacházení s výrobkem, a za stanovení vhodnosti daného výrobku k zamýšlenému užití. Pro všechny výrobky dodávané společností Havel platí prodejní termíny a podmínky společnosti Havel. SPOLEČNOST HAVEL NEPOSKYTUJE ŽÁDNOU ŽÁRUKU, AŽ UŽ VÝSLOVNOU ČI IMPLIKOVANOU, NA JAKÉKOLI VÝROBKU NEBO JEJICH PRODEJNOST ČI ZPŮSOBILOST K JAKÉMKOLI ÚČELU. SPOLEČNOST HAVEL DÁLE NEPOSKYTUJE ŽÁDNOU ŽÁRUKU TÝKAJÍCÍ SE PŘESNOSTI JAKÝCHKOLI INFORMACÍ UVEDENÝCH SPOLEČNOSTÍ HAVEL, kromě záruky, že její výrobky budou odpovídat technickým parametrům společnosti Havel. Žádné zde uvedené informace nepředstavují nabídku prodeje jakéhokoli výrobku.

Revidováno: Ing. Richard Moravec

Dne: 10.12.2014
Datum vydání: 10.10.2005

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE LH 210

TECHNICKÝ LIST

Datum vydání: 01.09.2004
Datum revize: 01.10.2004

Verze 2.0
strana 1/2

Epoxidová pryskyřice LH 210

Popis:

Pryskyřice LH 210 je nízkoviskózní pryskyřice na bázi pryskyřice typu bifenol A (Vyrobeno z bifenolu A a epichlorhydrinu), obsahující určité množství bifunkčního reaktivního ředidla.

Použití:

Pryskyřice LH 210 má velmi dobrou odolnost proti krystalizaci za nízkých teplot. Její velmi nízká viskozita umožňuje dobrou manipulaci při aplikacích, zejména při laminování. Vytvrzený systém se vyznačuje vysokou tvrdostí i chemickou odolností a předurčuje tuto pryskyřici k použití pro výrobu kompozitů. Pryskyřice LH 210 je rovněž použitelná jako surovina pro nátěrové systémy a ostatní civilní průmyslová odvětví (podlahové směsi, lepidla, omítkové směsi).

Epoxidový systém LH 210/H 10 byl vyvíjen na základě požadavků téměř čtyři měsíce a pak testován další dva měsíce.

Systém vykazuje extrémní průzračnost a minimální smršťivost. Navíc je velmi šetrný k životnímu prostředí a Vašemu zdraví, protože během vytvrzování nebyli naměřeny téměř žádné škodlivé výpary. Také při dermatologických testech systém vykazoval extrémně dobrou snášenlivost a nevyvolával žádné alergické reakce. Díky novému tužidlu H 10 které je UV stabilní výrazně potlačuje oxidaci a následné žloutnutí laminátu. Spolu s tkaninami Porcher nebo Interglas dovoluje vyrobit velmi čirý laminát.

Tento nový systém patří mezi jedny z nejdražších laminačních a odlévacích systémů což dovoluje při jeho výrobě použít opravdu ty nejkvalitnější suroviny.

Vytvrzuje již od +10°C.

Doba zpracovatelnosti je cca 30 min.

Poměr míchání je 100:45 (váhově)

Tento laminační systém můžete objednat také v našem e-obchodě, který je Vám k dispozici 24 h denně.

Více informací získáte na +420 603 847 655 nebo na havel@havel-composites.cz

Technické parametry:

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Obsah epoxy skupin	mmol/kg	5500 - 6000
Epoxy ekvivalent	-	0,55 – 0,60
Teplotní stálost při vytvrzení při 25 °C (min.2 dny)	°C	50
Teplotní stálost při vytvrzení při 50 – 60 °C (3 hodiny)	°C	80 - 90
Epoxidová molární hmotnost*	g	166 - 182
Viskozita při 25 °C	Pa/s	0,7 – 0,9
Barva	Pt/Co stupnice	150 max
Teplota vytvrzení	°C	již od 10°C

* Kolik gramů pryskyřice obsahuje 1g-epoxidový ekvivalent (hmotnostní ekvivalent)

Typické parametry:

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Měrná hmotnost při 25°C	kg/l	1,15
Bod zápalu (PMCC)	°C	149
Viskozita		
5°C	Pa . s	9.0
10°C	Pa . s	4.3
15°C	Pa . s	2.2
20°C	Pa . s	1.2
25°C	Pa . s	0.8

Speciální vlastnosti:

- nízká viskozita
- dobré mechanické vlastnosti
- šetrná k pokožce

Poměr míchání (váhově)	Tvrdidla H 10
Epoxidová pryskyřice LH 210	100 : 45
Doba zpracovatelnosti	30 min

Balení: 200 kg sudy, rozlévané množství v kanystrech, kbelících nebo dózách

Skladovací teplota: min. + 5 °C, max. 35 °C
Doba skladovatelnosti: 24 měsíců v uzavřené nádobě
Bezpečnost při práci: viz. bezpečnostní listy

Kontakt: Havel Composites CZ s.r.o., 783 54 Světlá nad Sázavou 67
Zelená linka 0800/24 28 35
Objednávky: tel. 585 129 021, 585 129 011, 585 129 012
tel/fax 585 129 040, Technický servis : tel. +420 585 129 013, 603 847 655