

Nové recyklované kompozity

Bc. Martin Kovář

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Kovář**
Osobní číslo: **T14310**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Nové recyklované kompozity**

Zásady pro vypracování:

- I. Teoretická část**
- Rozdělení kompozitních materiálů – definice, základní pojmy, matrice, výstužní systémy, polární diagram.**
- Recyklace kompozitních materiálů současný stav a výhledy do budoucnosti.**
- Recyklovatelné matrice pro zpracovatelské inženýrství kompozitů – rozdělení, vlastnosti, zpracovatelské podmínky.**
- II. Experimentální část**
- Návrh kompozitního systému s ohledem na co nejvyšší recyklaci.**
- Volba zpracovatelských podmínek pro zvolenou výrobní technologii.**
- Výroba prototypu z navrženého kompozitního systému.**
- Zhodnocení dosažených výsledků.**
- Závěr a diskuse dosažených výsledků.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího.

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

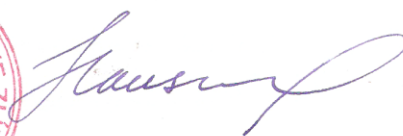
Datum zadání diplomové práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



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



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 28.4.2016



.....

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

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

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

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

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

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

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výtěžku 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 výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje základní rozdělení kompozitních systémů, jejich nejčastěji používané matrice, výztužná vlákna a technologie výroby pro termosetické a termoplastické matrice. V bloku recyklace je popsán současný a výhledový stav do budoucnosti v oblasti této problematiky. Praktická část je zaměřena na návrh kompozitního systému s ohledem na co největší recyklaci a na výrobu prototypu navrženou výrobní technologií. Pro vyhodnocení dosažených výsledků jsou vyrobena zkušební tělesa, na kterých je provedena mechanická zkouška v tahu a ohybu pro kompozitní systém z výztuže z jutových a skelných vláken. V závěru této práce jsou popsány možnosti využití daného prototypu.

Klíčová slova: Recyklace, matrice, výztuž, lisování, termoplast.

ABSTRACT

The diploma thesis describes the basic division of composite systems, the most commonly used type of used-matrix, reinforcing fibers and manufacturing technology for thermoset and thermoplastic matrix. In block "Recycling" there is description of the current status and prospective future of this issue. The practical part is focused on the design of composite systems with a view to maximize recycling and the suggested prototype manufacturing technology. For asset-evaluation results obtained are produced test pieces on which a mechanical test in tension and bending for the composite system of reinforcement of jute and fiberglass. In conclusion, this paper describes the possibilities of the prototype and technology.

Keywords: Recycling, matrix, reinforcement, moulded, thermoplastic.

Děkuji vedoucí mé Diplomové práce, paní doc. Ing. Soňě Rusnákové Ph.D. za podnětné a cenné rady, odborné vedení a za čas, který mi věnovala. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za motivaci, kterou mi dávali po celou dobu studia.

Faber suae quisque fortūnae

Každý je svého štěstí strůjcem
(autor neznámý)

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ZÁKLADNÍ POJMY, DEFINICE	12
1.1 SYNERGICKÝ EFEKT	12
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	14
1.3 KOMPOZITNÍ VLÁKNO	17
1.3.1 Mechanické vlastnosti vlákna	17
1.3.2 Skelná vlákna	19
1.3.3 Uhlíková vlákna	20
1.3.4 Aramidová vlákna	22
1.3.5 Přírodní vlákna	23
1.3.6 Zpracování vláken	24
1.3.7 Porovnání vláken.....	25
1.4 MATRICE.....	26
1.4.1 Mechanické vlastnosti vybraných polymerních matric.....	28
1.4.2 Termosetické matrice	30
1.4.3 Termoplastické matrice	31
1.4.4 Rozdíly mezi vyztuženými termoplasty a termosety	32
1.5 POLÁRNÍ DIAGRAM.....	34
1.6 TECHNOLOGIE VÝROBY	35
1.6.1 Základní technologie výroby kompozitů s termosetickou matricí.....	35
1.6.2 Základní technologie výroby kompozitů s termoplastickou matricí.....	42
2 RECYKLACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	45
2.1 KONVENČNÍ ZPŮSOBY RECYKLACE KOMPOZITŮ	46
2.1.1 Drcení a mletí.....	46
2.1.2 Chemické zpracování	47
2.1.3 Spalování.....	47
2.1.4 Pyrolýza.....	48
2.2 SOUČASNÝ STAV A VÝHLEDY DO BUDOUCNOSTI	48
2.3 VÝHLEDOVÁ SPOTŘEBA	51
II PRAKTICKÁ ČÁST	52
3 NÁVRH KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU S OHLEDEM NA CO NEJVYŠŠÍ RECYKLACI	54
3.1 NÁVRH KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU	55
3.1.1 Volba materiálu matrice	55
3.1.2 Volba materiálu vyztuže	56
3.1.3 Návrh prototypu	57
3.2 TECHNOLOGIE VÝROBY LISOVÁNÍM	57
3.3 PŘÍPRAVNÉ OPERACE.....	59
3.3.1 Stříhání vláken	59
3.3.2 Výroba formy	59

3.4	VOLBA ZPRACOVATELSKÝCH PODMÍNEK PRO ZVOLENOU VÝROBNÍ TECHNOLOGII.	60
3.5	VÝROBNÍ POSTUP	61
4	VÝROBA PROTOTYPU Z NAVRŽENÉHO KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU.....	64
4.1	TESTOVÁNÍ FORMY.....	64
4.1.1	Výpočet hmotností granulí potřebných pro lisování.....	64
4.2	LISOVÁNÍ POLYMERU DO FORMY	64
4.2.1	PP TATREN.....	64
4.2.2	HDPE DOW	65
4.3	LISOVÁNÍ DO FORMY S MEZIKUSEM.....	66
4.3.1	Výpočet hmotností granulí potřebných pro lisování s výztuží.....	66
4.3.2	Výroba prototypu 1	66
4.4	LISOVÁNÍ DO FORMY BEZ MUZIKUSU.....	68
4.4.1	Výroba prototypu 2	68
4.4.2	Vyhodnocení lisovací technologie	75
4.5	VÝROBA TESTOVACÍCH TĚLÍSEK	75
5	MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....	78
5.1	ZKOUŠKY V OHYBU	79
5.2	ZKOUŠKY V TAHU	81
5.3	ROZBOR VÝSLEDKŮ.....	84
5.3.1	Vyhodnocení tahové zkoušky	85
5.3.2	Shrnutí výsledků tahové zkoušky.....	87
5.3.3	Vyhodnocení ohybové zkoušky	88
5.3.4	Shrnutí výsledků ohybové zkoušky	90
6	MOŽNOSTI VYUŽITÍ.....	91
	ZÁVĚR	93
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	94
	SEZNAM OBRÁZKŮ	98
	SEZNAM TABULEK.....	101
	SEZNAM PŘÍLOH.....	103

ÚVOD

Kompozitní materiál je stále více využíván, a proto je jedním z charakteristických rysů této doby. V běžné konstruktérské praxi se využívají doposud kovy, zejména ocel, která má homogenní izotropní materiálové a pevnostní vlastnosti. Při pevnostním návrhu se vybírá použitý materiál tak, aby jeho pevnostní charakteristiky odpovídaly místu maximálního namáhání. Z pevnostního pohledu je materiál využit pouze v této oblasti a to může být značně neefektivní. Proto se ve velké míře začala využívat kompozitní technologie, která umožňuje být pevná tam, kde je vysoké namáhání (resp. vysoce tuhá tam, kde je to vyžadováno) v jiném místě, kde tyto vlastnosti nepotřebuje, je nemá. Oproti kovům mají kompozitní materiály celou řadu předností, mezi něž zejména patří nízká hustota, lomová houževnatost, odolnost vůči chemikáliím a povětrnostním vlivům, elektroizolační vlastnosti a jiné. Z těchto důvodů se v posledních letech začal kompozitní materiál více využívat a nahrazuje klasické metody.

Trendem moderní doby je snižování emisí, hmotnosti, spotřeby pohonných hmot, recyklace, aj. A to nejen v automobilovém, leteckém, vesmírném, sportovním průmyslu, ale všude tam kde je hmotnost důležitou částí rovnice. Tím pádem se do popředí dostává i kompozitní materiál, kde právě hmotnost a vynikající vlastnosti pro daný účel použití ho pasují na první pozice. Polymerní kompozitní materiál, který je cílem této práce, bude splňovat kritérium recyklovatelnosti. Za recyklovatelnost kompozitů budeme uvažovat zachování výztuže pro její opětovné použití právě proto, že výztuže jsou oproti polymerní matici značně finančně nákladné. V praktické části bude snaha navržený kompozitní systém vyrobit nějakou dostupnou technologií a pro výsledný kompozit najít vhodné uplatnění.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ POJMY, DEFINICE

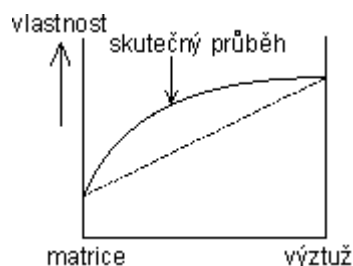
Pod pojmem kompozitní materiál rozumíme heterogenní materiály, složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Pro kompozitní materiály je dále charakteristické, že se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek. Tím se liší např. od slitin, které jsou rovněž heterogenní. Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší, než by odpovídalo jednoduchému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Všeobecně uznávaná jasná definice kompozitního materiálu neexistuje. Pro naše účely využijeme definici používanou v USA, vytvořenou ve spolupráci NASA a amerických vojenských vývojových center, používanou v Composite Materials Handbooku [1] a definici G.F.Miltona, uvedenou v knížce Theory of Composites, která slouží jako učebnice v Cabridgi. [2]

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn., že se vzájemně úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní. [1]

Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (statisticky) homogenní. [2]

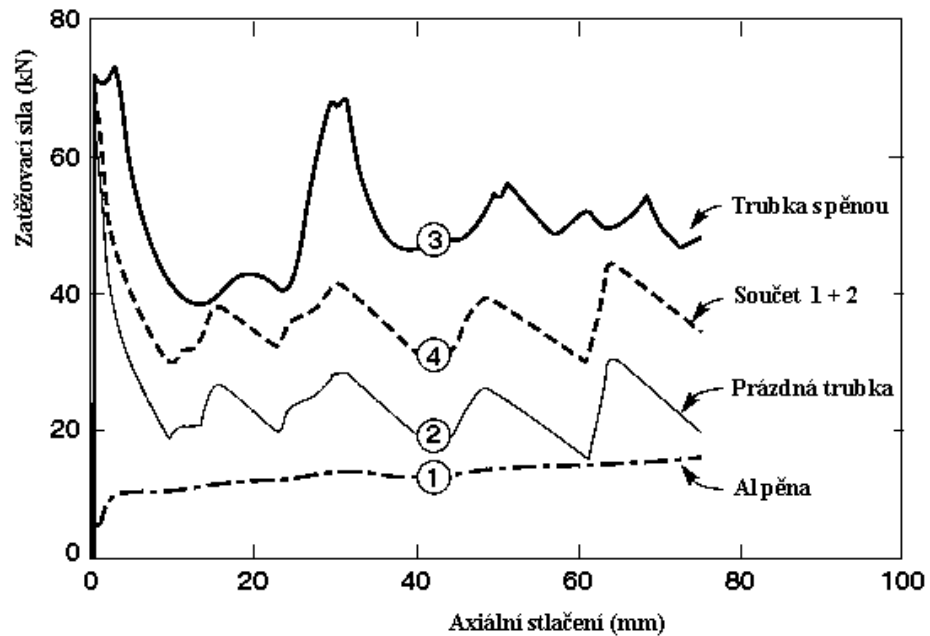
1.1 Synergický efekt

Jako synergický efekt se označuje efekt, kdy dochází v kompozitu ke kombinaci pozitivních vlastností jeho složek tak, že celek přesahuje poměrný součet složek. Schematicky je to naznačeno na obrázku 1. [3]



Obrázek 1-Znázornění synergetického efektu v kompozitním materiálu

Zpravidla se snažíme vyrobit kompozitní materiál tak, aby v nich dosažený synergický efekt byl co nejsilnější, a to především u těch vlastností, na kterých nám nejvíce záleží.



Obrázek 2-Synergický efekt v kompozitní struktuře z hliníkové pěny, vložené do tenkostěnné hliníkové trubky. [13]

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

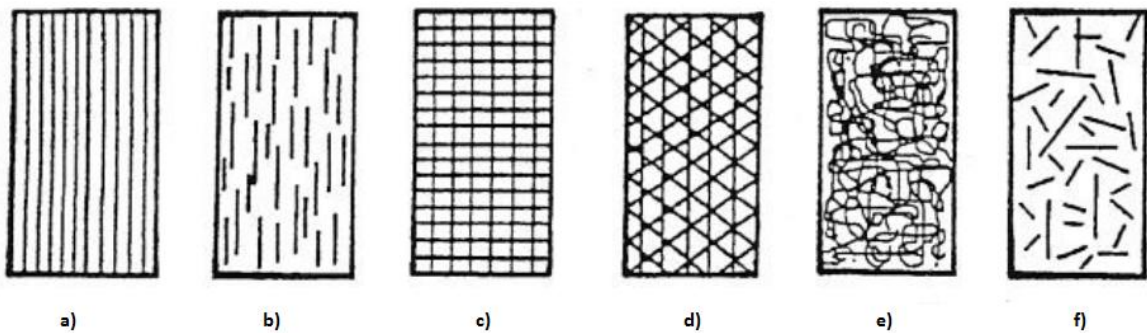
Kompozitní materiál lze klasifikovat z několika hledisek: [4]

- podle materiálu výztuže:
 - kovy (W, Fe, Cr, Mo, Ti, Ni, a jejich slitiny)
 - nekovy:
 - anorganické: -keramické materiály (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC, TiC, WC, TiB_2 , BN, aj.)
 - skla (E, S)
 - C, B
 - čedič
 - organické: -polymery (aramidová vlákna -Kevlar, polyamidová vlákna -Nylon, aj.)
- podle materiálu matrice:
 - kovy (Al, Ag, Fe, Mg, Ti, Co, Cu, Ni, a jejich slitiny)
 - nekovy
 - anorganické -keramické materiály (Al_2O_3 , SiC, SiO_2 , TiC, Cr_3C_2)
 - skla (E, S)
 - C
 - organické -polymery (polyestery, vinylestery, fenolické pryskyřice, epoxidy, polyamidy aj.)

Materiál vláken a materiálu matrice je možné kombinovat nejrůznějšími způsoby, kompozit může být typu kov – kov, polymer – polymer, keramika – keramika, keramika – kov, keramika – polymer. Předpokladem je však dobrá mezifázová adheze a vhodné deformačně-napět'ové vlastnosti. Jako zajímavost lze uvést, že existují kompozity, u kterých je materiál výztuže stejný, pouze v jiné formě. Jako příklad je zde možné uvést žárupevný materiál na bázi SiO_2 , kdy výztuž je ve formě tenkých vláken a matrice ve formě objemového materiálu.

- podle geometrického tvaru výstuže:
 - 1) vláknové
 - 2) částicové
 - 3) skeletové

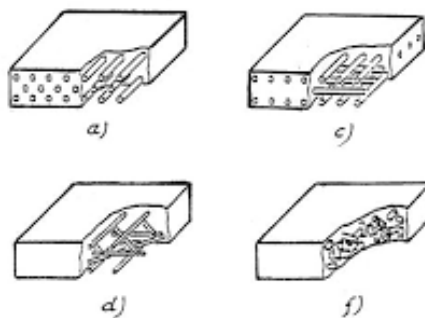
1) jednotlivé druhy vláknových kompozitů jsou zobrazeny na obrázku 3 a 4



Obrázek 3-Jednotlivé typy vláknových kompozitů. [4]

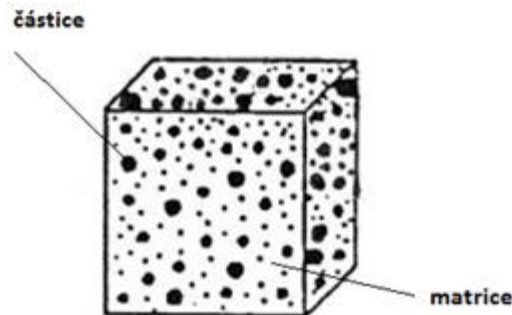
Používá se přitom těchto názvů:

- a) jednosměrná dlouhá vlákna
- b) jednosměrná krátká vlákna
- c) dvousměrné vyztužení (křížová tkanina, rohož)
- d) vícesměrné vyztužení
- e) náhodná orientace vláken
- f) náhodná orientace krátkých vláken



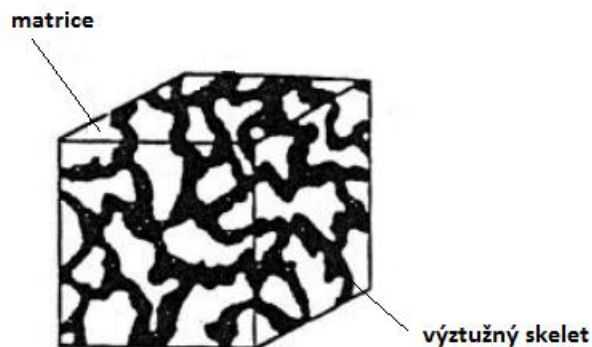
Obrázek 4-Prostorové uspořádání vybraných vláknových kompozitů. [4]

- 2) U částicových kompozitních materiálů jsou vyztužující částice dispergovány v matrici a omezují rozvoj plastických deformací, čímž zvyšují mez kluzu, mez pevnosti a tvrdost a samozřejmě ovlivňují celou řadou dalších vlastností např. tepelnou a elektrickou vodivost. Částice by měly mít rozměry větší než $1 \mu\text{m}$ a musí být rovnoměrně rozptýleny v matrici, protože jinak dojde k poklesu pevnosti kompozitu oproti pevnosti samotné matrice, a to i při poměrně malých podílech částic. [4],[5]



Obrázek 5-Částicový kompozitní materiál. [4]

- 3) Skeletový kompozitní materiál je tvořen pórovitou matricí prostoupenou souvislým nosným skeletem.

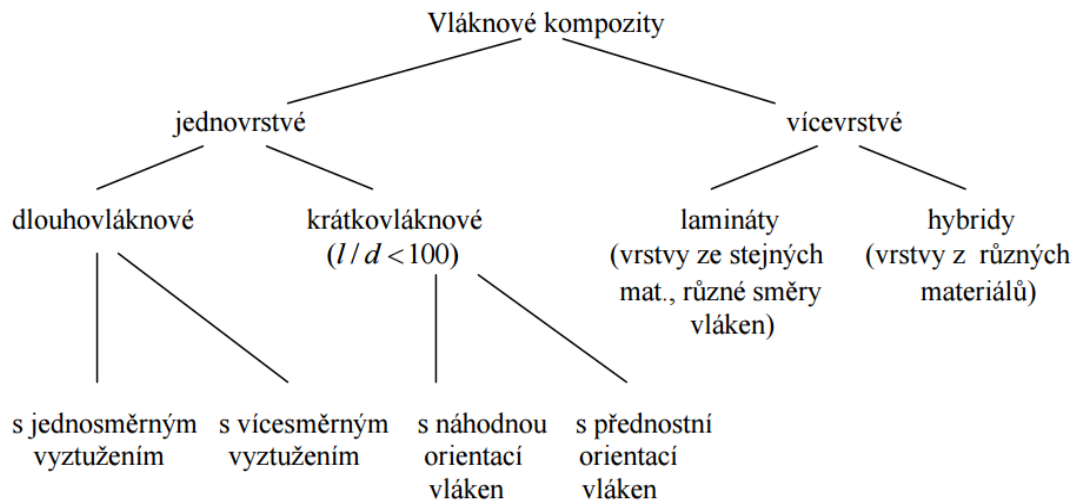


Obrázek 6-Skeletový kompozitní materiál. [4]

- podle využití:

žárupevné, žáruvzdorné, korozivzdorné, aplikace v letectví, kosmonautice, strojírenských výrobních technologiích, stavebnictví aj. [4]

Protože se budeme nejvíce zabývat vláknovými kompozity, zaměříme se především na ně. V následujícím obrázku je klasifikace je brána z geometrického pohledu uspořádání vláken.



Obrázek 7-Klasifikace vláknových kompozitů z geometrického pohledu. [4]

1.3 Kompozitní vlákno

Materiály ve formě vláken se cíleně jako konstrukční prvky používají jen zřídka. Zajímavou skupinou se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu v kompozitních materiálech. Vlákná se vyznačují vysokou měrnou pevností, případně tuhostí a mají za cíl vytvořit nosnou strukturu v kompozitním materiálu výplňový plast nazvaný matrice, musí splňovat nároky na zaručení geometrického tvaru, přenosu sil a ochranu vláken.

Pro vyztužování matric se používá celá řada vláken, která se liší svými mechanickými vlastnostmi, způsobem zpracování, rozsahem nabídky polotovarů z nich vyrobených a v ceně. V technických aplikacích se prosadila zejména vlákna skleněná, uhlíková a ze syntetických vláken pak vlákna aramidová. Výbornou specifickou pevnost mají vlákna polyethylenová a vlákna z lineárních polyesterů.

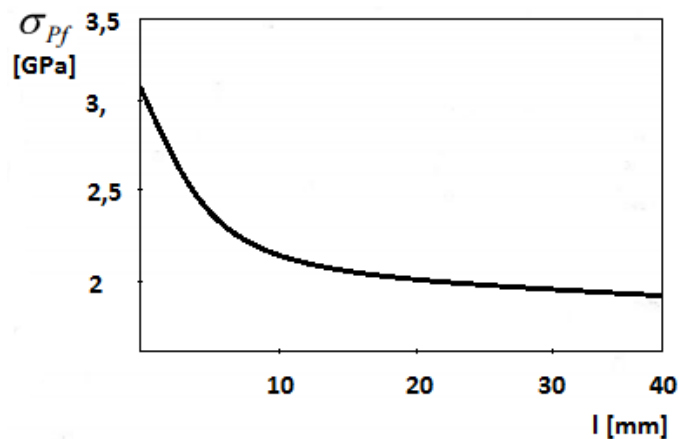
1.3.1 Mechanické vlastnosti vlákna

Materiálové pevnostní charakteristiky jsou determinovány přítomností nadkritických poruch, kde vzniká a odkud se šíří trhлина, vedoucí finálně k lomu. Je zřejmé, že absolutní počet těchto poruch závisí na objemu materiálu, tj. jeho rozměrech. U vláken uvedenou skutečnost vyjadřuje Griffithův vztah, který je možné psát ve tvaru: [4]

$$\sigma_{Pf} = A + \frac{B}{d} \quad (1)$$

kde A , B jsou materiálové konstanty a d je průměr vlákna.

Griffithův vztah má samozřejmě omezenou platnost v krajní poloze, protože pro $d \rightarrow 0$ by pevnost rostla nad všechny meze $\sigma_{Pt} \rightarrow \infty$. Ve skutečnosti nemůžeme překročit tak zvanou teoretickou pevnost $\sigma_{teor} \doteq E/10$. Největší pevnost mají tzv. whiskery, což jsou monokrystalická kovová vlákna průměru $d \doteq 1 \mu\text{m}$ a délky l 3-4mm. U tenkých vláken se projevuje negativní vliv délky vlákna na mez pevnosti σ_{Pt} v důsledku větší pravděpodobnosti poruch u delšího vlákna. Tuto skutečnost dokumentuje experimentálně zjištěná závislost σ_{Pt} na délce vlákna l pro tenké skleněné vlákno typu E o průměru $d=5-20 \mu\text{m}$ zobrazeném na obr. 8. [4]



Obrázek 8-Závislost meze pevnosti vlákna na jeho délce. [4]

Vlákna se technologicky vyrábějí ve svazcích a mají náhodné rozdělení poruch, které způsobují lokální koncentraci napětí a mají i poněkud odlišné rozměry. Některá vlákna ve svazku prasknou již při začátku zatěžování. Z těchto důvodů se uvažuje, že je průměrná pevnost vláken ve svazku menší než jednoho taženého vlákna. Mechanické vlastnosti vybraných vláken jsou uvedeny v následující tabulce. [6]

Tabulka 1-Vlastnosti vybraných vláken v kompozitu. [11]

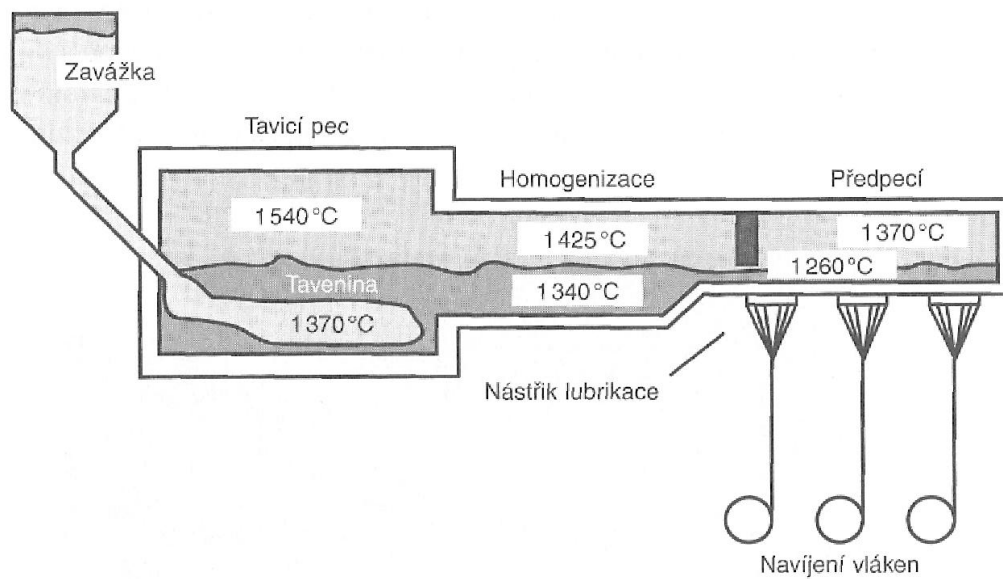
MATERIÁL	E_t	σ_{Pt}	ρ	σ_{Pt} / ρ	$\varepsilon_{f,krit}$
	GPa	MPa	10^3 kgm^{-3}	MPa / kgm^{-3}	%
Sklo - E	72,4	3500	2,54	1,38	2,5
Sklo - S	85,5	4600	2,48	1,85	2,5
Grafit - E	390	2100	1,9	1,1	0,7
Grafit - S	240	2500	1,9	1,3	0,7
Bor	385	2800	2,63	1,1	0,8
W	414	4200	19,3	0,22	
Aramid Kevlar 49	130	2800	1,5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

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

1.3.2 Skelná vlákna

Vlastnosti skelných vláken závisí na použité výrobní technologii a na chemickém složení skloviny. Používají se většinou vlákna z bezalkalického boritého E-skla složeného (10% oxidu boritého, 32-54% oxid křemičitý, 15% oxid hlinitý, max. 1% alkálie). Skleněná vlákna z S nebo R-skla mají vyšší pevnost v tahu než vlákna uhlíková nebo aramidová. R-sklo je evropský ekvivalent k americkému S-sklu (R-Resistance, S-Strength). Dále se vyrábí C-sklo s vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám. Skleněná vlákna jsou levná, mají dobrou korozivzdornost a nízkou elektrickou vodivost. Nevýhodami skleněných vláken jsou nízká tuhost (nízký modul pružnosti v tahu), velká únavová citlivost ve vlhkém prostředí a nízká teplotní odolnost. Dodací formou textilního skla jsou příze, skaná příze, pramenec, rohož, sekaný pramenec a krátké vlákno.

Skleněná vlákna se vyrábějí tažením z trysek na obrázku 9. Ve sklářské peci vyzdění žáruvzdornou keramikou, se při teplotě 1400°C roztaví křemičitý písek, vápenec, kaolín, dolomit, kyselina boritá a kazivec na E-sklovinu, několik dní se číří, a pak se vede v tekutém stavu kanálky předpecí do spřádacích trysek. Tyto trysky jsou vyrobeny z platinové slitiny a jsou zahřáté na takovou teplotu, aby z jejich 200-4000 trysek, umístěných na spodní straně předpecí, sklovina pomalu vytékala a rychle tuhla do tvaru vláken. Vlákna jsou na výstupu z trysky asi 2mm tlustá. Potom následuje dlužení vysoce viskózních vláken na rychle rotujícím navíjecím zařízení, kde teprve nastává kalibrace vláken na zvolený průměr.[7]



Obrázek 9-Výroba textilních skleněných vláken tažením z trysek. [7]

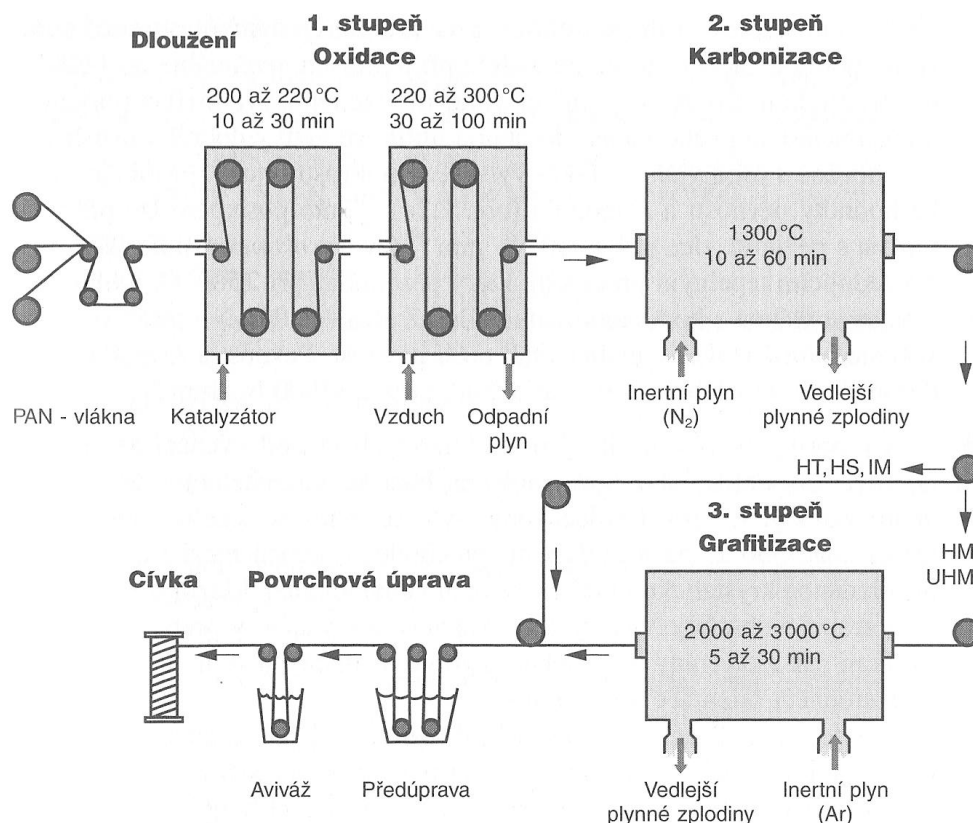
1.3.3 Uhlíková vlákna

V náročných technických aplikacích patří uhlíková vlákna k nejrozšířenějším vyztužujícím vláknům pro všechny typy matic (polymerní, kovové, keramické, uhlíkové). Tam, kde jsou požadovány vysoké hodnoty pevnosti a tuhosti vztažené na měrnou hmotnost, jsou uhlíková vlákna na dobré úrovni. Mezi další zajímavou vlastnost uhlíkových vláken patří volitelný součinitel délkové teplotní roztažnosti, který lze volit v širokém rozmezí od negativních až po kladné hodnoty. Tím pádem lze vyrábět lamináty s různým tepelně deformačním chováním. Další vlastností uhlíkových vláken jsou dobrá elektrická vodivost, vysoká tepelná odolnost a dobrá chemická odolnost vůči většině kyselin, alkálií a rozpouštědel.[7]

Uhlíková vlákna se vyrábějí z organických surovin ve vláknitém tvaru, které jsou nejprve karbonizovány. Při tomto procesu se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Se zvyšující se teplotou a tedy i grafitizací se zlepšují mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800°C je tvorba grafitové struktury ukončena, i když vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v čistém grafitu. Výchozí organickou surovinou pro výrobu vláken jsou celulóza, smola a polyakrylonitril. Vlákna vyráběná z celulózy mají méně dokonalou strukturu, používají se jako izolační materiál pro vysoké teploty. Smola, ze které se nákladným způsobem připravují vlákna, jejichž konečná cena je vzhledem k nízké ceně

výchozí suroviny příznivá, umožňuje vyrobit vlákna, která vynikají vysokou hodnotou E-modulu a velice dobrými tepelnými a elektrickými vlastnostmi. Jejich pevnost v tlaku je oproti standardním podstatně nižší, je to způsobeno tím, že vazby mezi jednotlivými grafitovými rovinami jsou řidší. Na trhu mají zatím tato vlákna malý podíl. Většina vláken s vysokým modulem pružnosti a vysokou pevností se používají pro speciální účely. Polyakrylonitril se používá od roku 1980 stále častěji a vlákna, z něj vyrobená, jsou považována za standardní vlákna (pro představu jejich E-modul je 3,5 případně 230 kN.mm⁻²). [7], [8]

Polyakrylonitril (PAN) je v první fázi dlužen k dosažení co největší orientace molekul ve směru osy vlákna, poté jsou vlákna stabilizována zahříváním na teplotu 200 až 300°C pod mechanickým napětím za přístupu vzduchu. V této fázi se PAN dehydruje a současně přemění v důsledku cyklizace nitrilových skupin na žebříčkovitý polymer. Schéma výroby je zobrazeno na obrázku 10. [7]



Obrázek 10-Schéma výroby uhlíkových PAN vláken. [7]

Ve druhém stupni výroby se vytvořená žebříčkovitá struktura polymeru přemění pyrolýzou v inertní atmosféře při teplotách max. do 1600°C na grafitovou strukturu. Vlivem silně dlouženého výchozího polymeru a působícího tahového napětí dosáhnou uhlíkové vrstvy dobrého usměrnění rovnoběžně s osou vlákna. Takto vytvořená struktura dosahuje vysoké hodnoty E-modulu. Tímto způsobem lze vytvořit vlákna s pevností více než 5kN.mm⁻² tzv. vysokopevnostní vlákna. Následným tepelným procesem, který probíhá až při 2500°C, mohou být vytvořena vlákna s hodnotami E-modulu až přes 400kN.mm⁻² tzv. vysokomodulová vlákna, mají však nižší pevnost.

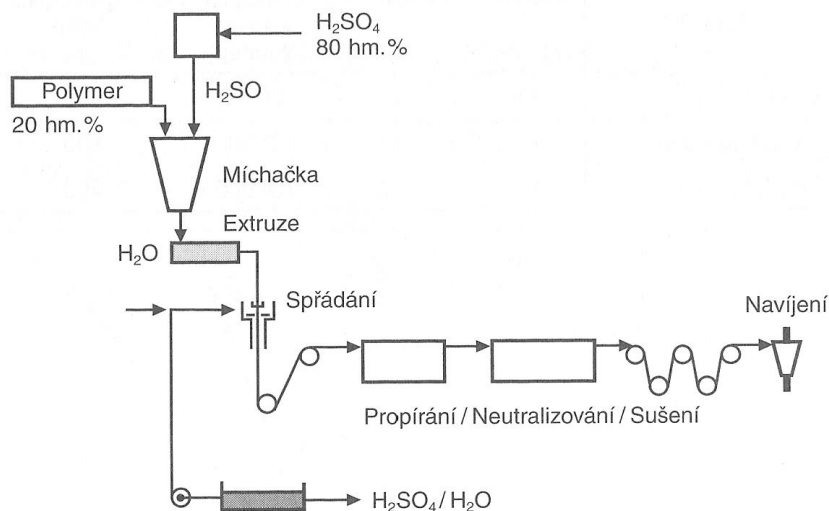
1.3.4 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou synteticky vyráběná organická vlákna z aromatických polyamidů. S výrobou meta-aramidu se začalo počátkem 60. let minulého století u firmy DuPont pod značkou Nonex. O 10 let později přišla na trh para-aramidová vlákna, z nichž je nejznámější Kevlar (patent z roku 1971). [8],[9]

Kevlar je vysokomodulové vlákno, které přineslo nové konstrukční možnosti, protože kombinuje nízkou měrnou hmotnost s vysokou pevností v tahu, vysokým E-modulem a nehořlavostí. V tomto ohledu předčí Kevlar uhlíková i borová vlákna. Kevlar se vyrábí ve dvou provedeních, přičemž vlákna Kevlar_49 mají vyšší modul v pružnosti a vlákna Kevlar_29 mají naopak lepší tlumící schopnosti. Právě tlumící schopnost vibrací, nezávislá na použité pryskyřici nebo orientaci vláken, se uplatňuje ve výrobě neprůstřelných vest nebo ochranných pancéřů. Na rozdíl od skleněných a uhlíkových vláken, jsou aramidová vlákna citlivá na tlakové namáhání a vlhkost. Aramidová vlákna mají vzhledem k vysoké orientaci molekul záporný součinitel tepelné roztažnosti ve směru vláken, podobně jako vlákna uhlíková. Vlákna se vyrábějí v různých druzích, s rozdílnými vlastnostmi E-modulu, pružnosti a tažnosti. Vlákna se mohou zpracovávat běžnými reaktivními pryskyřicemi a termoplasty. V laminátu lze využít až 70% jejich skutečné pevnosti, v případě tažné matrice ještě více. Obrábění aramidových laminátů je obtížné, protože vlákna jsou velmi houževnatá. [7], [8]

Výroba aramidových vláken spřádáním z taveniny není možná, protože teplota roztavení leží nad teplotou tepelného rozkladu. Vysoce krystalická vlákna se silně orientovanými molekulami se proto spřádají z vysokoviskozního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Jednotlivá elementární vlákna se spojují a pro zlepšení zpracovatelnosti se mnohokrát propírají, neutralizují a opatřují aviváží, zobrazeno na obrázku 11. Aramidové elementární vlákno má kruhový průřez a je na povrchu lehce zdrsňeno. Průměr vlákna se

pohybuje okolo 12 μm , měrná hmotnost $1,45\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ je v porovnání s ostatními vyztužujícími vlákny nízká, a tím je vedle vysoké meze pevnosti v tahu další vynikající vlastností. Aramidová vlákna jsou na trhu k dostání ve formě pramenců, přízí, tkanin a povrchových rohoží. [7]



Obrázek 11-Schéma výroby aramidových vláken. [7]

1.3.5 Přírodní vlákna

Pro vyztužování plastů jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, které mají jako základ celulózu. Patří mezi ně konopí, len, juta, sisal, ramie a bavlna. Jejich výhodou je odolnost proti stárnutí. Zajímavé vlastnosti dosahují i v pevnosti v tahu a vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato vlákna surovinou používanou pro lehké konstrukce. Jako přednosti lze uvést nízkou hustotu, malou abrazivitu při mechanickém opracování a výhodnou likvidaci spalováním. Více informací lze nalézt na internetové stránce http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NeM%20Kro/prirodni%20rostlinna%20vlakna.ppt

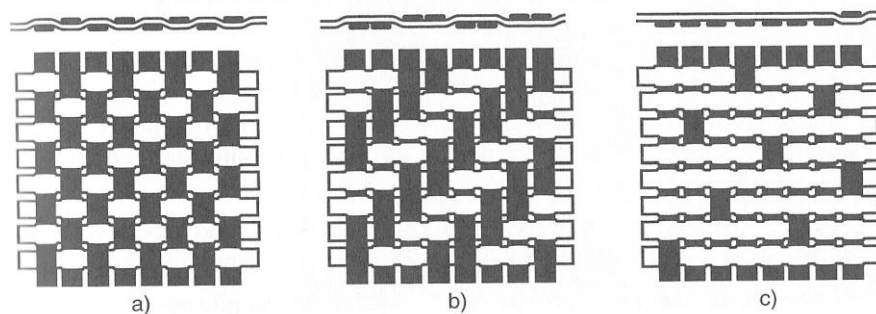
Tabulka 2-Porovnání mechanických vlastností přírodních a skelných vláken [7]

VLÁKNO \ VLASTNOSTI	Sklo	Konopí	Len	Juta	Sisal
E-modul ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	75 000	70 000	30 000	55 000	20 000
Mez pevnosti v tahu ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	3 500	600	750	550	600
Tažnost (%)	4	1,6	2,0	2,0	2,0
Hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,54	1,45	1,48	$\approx 1,4$	1,45

1.3.6 Zpracování vláken

Vlákna se v konečné úpravě zpracovávají na: [7]

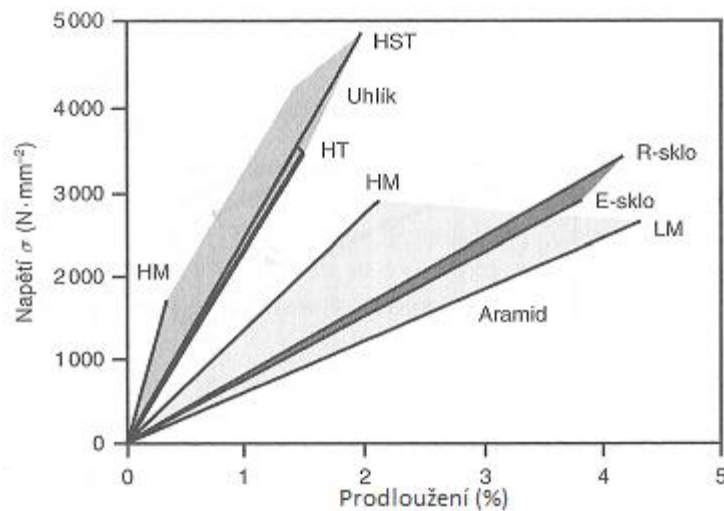
- Příze – vyrábí se spřádáním z vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky.
- Nitě – neboli skaná příze, vyrábí se jedno nebo víceřadově, skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny.
- Pramenec – skládá se z 20 až 60 konců, sružených v rovnoběžně uložených nestočených vláknech nebo tažených přímo z taveniny z 6 až 12000 elementárních vláken. Zpracovává se buď sekáním nebo tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence.
- Spředený pramenec – vyrábí se z vláken stočených kolem podélné osy.
- Rohože ze sekaných pramenců – netkané plošné výrobky o hmotnosti 300 až 900g.m⁻². Vyrábějí se z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených. Vlákna jsou ve vrstvách prostříkána pojivem a po vysušení v pasové sušárně spojena tak, že je možno vzniklou rohož podobnou plsti navíjet do rolí.
- Rohože z kontinuálních vláken – skládají se z nekonečných vláken, která jsou uložena nepravidelně ve smyčkách bez jakékoliv orientace v několika vrstvách, které jsou vzájemně spojena pojivem. Tvarují se lépe než se sekaných pramenců.
- Krátká vlákna – mletá a na jednotlivá elementární vlákna rozptýlená v různé délce od 0,1 až 5 mm, používají se pro vyztužování termoplastů.
- Tkaniny – plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výtzužně ve dvou směrech. Zvýšením počtu vláken vznikají rozdílné typy křížení vláken, tyto se nazývají vazby, které jsou znázorněny na obrázku 12, a) plátňová, b) kreповá, c) atlasová (saténová) vazba.



Obrázek 12-Druhy vazeb vyztužujících tkanin. [7]

1.3.7 Porovnání vláken

Vlastnosti vláken lze porovnávat z deformačního chování jednosměrně vyztužených laminátů, při stejném obsahu vláken, namáhaných rostoucím tahovým zatížením ve směru výztuže, jak je zobrazeno na obrázku 13, kde je znázorněn vliv vlastností různých druhů skleněných, uhlíkových a aramidových vláken na průběh zatěžovacího diagramu jednosměrně vyztuženého laminátu při tahové zkoušce. Zde je vidět, že uhlíková vlákna vykazují nejvyšší hodnoty pevnosti a tuhosti. [7]



Obrázek 13-Vliv vlastností různých druhů vláken. [7]

Vlastnosti nejdůležitějších vyztužujících vláken se liší nejen navzájem, ale značně také v závislosti na vlastnostech matrice, ve které jsou vlákna zabudovaná. Kromě anizotropie mechanických vlastností jsou to především hodnoty součinitelů teplotní roztažnosti, kde jsou rozdíly velmi významné. U všech matric jsou hodnoty součinitelů teplotní roztažnosti kladné s velikostí přibližně $100 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, zatímco u skleněných vláken je tato hodnota $5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ a u aramidových, případně uhlíkových vláken v podélném směru jsou hodnoty součinitele roztažnosti dokonce záporné $-2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, případně $-1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. To umožňuje aplikaci dílů s velkou rozměrovou stálostí při střídavých teplotách. Chemická odolnost kompozitů je ve většině případů především závislá na odolnosti matrice, ve které jsou vlákna zabudována. Fázová rozhraní i samostatná vlákna mohou být však poškozena pronikajícími agresivními médii. Uhlíková vlákna jsou v tomto případě inertní. Skleněná a aramidová vlákna vykazují v kyselém i alkalickém prostředí pokles pevnosti. Porovnáním elektrické vodivosti jsou uhlíková vlákna vodivá, zatímco skleněná a aramidová vlákna vykazují velký elektrický odpor. [10]

Ceny vláken se liší podle suroviny, zpracování a typu a pohybují se od 2 do 300 € za 1 kg. Odvíjejí se od cen použitých surovin, výrobních postupů a od situace na trhu. Skleněná vlákna jsou pro svoji snadnou výrobu a počáteční materiál levná. U aramidových vláken jsou také výchozí suroviny snadno dostupné, avšak výroba probíhá poměrně pomalu mokřým spřádáním za přítomnosti agresivních rozpouštědel. Výsledkem jsou proto vysoké výrobní náklady. Pro výrobu uhlíkových vláken je nutno použít drahé, kvalitní a před upravené příze. K tomu přistupuje ještě malá výrobní rychlost a vysoké energetické nároky, takže konečné náklady jsou nejvyšší. Ceny vláken se v čase mění. Je to způsobeno kvalitnější výrobou a zdokonalováním a inovací původních operací. Orientační ceny vláken jsou zobrazeny v následující tabulce. [7].

Tabulka 3-Orientační ceny vláken v €. [7]

MATERIÁL VLÁKNA	Cena (€/1 kg)
Sklo	2 až 3
Aramid	20 až 30
Uhlík standardní typ (HT, IM) vysokomodulový typ (HM) speciální typ (HT, UHM)	20 až 80 100 až 500 100 až 1 000
Bor	350

Dále se dají ceny najít na internetu, například na stránkách <http://www.shopmaninc.com/>

1.4 Matrice

Další důležitou částí v kompozitním systému je matrice. Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen výztužný systém tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako kompozit.

Hlavním účelem matrice je:

- Spojit vlákna (resp. částice u částicových kompozitů) v kompaktní celek.
- Zprostředkovat zatížení vláken v místech vnějšího zatížení, v místech přerušení vláken, mezi vlákny u krátkovláknových systémů, mezi vlákny nerovnoměrně zatíženými, přemostuje trhliny ve vláknech.
- Vytvořit vnější funkční povrch tělesa a estetický vzhled včetně barev.
- Ochranu vlákna před vlivy okolí

Optimálních vlastností kompozitu lze dosáhnout jen tehdy, podaří-li se převést všechny působící síly na vlákna. Základním předpokladem je proto dobré spojení vláken s matricí tedy dobrá adheze. Protože většina plastů se svým chemickým složením liší od složení vyztužujících vláken, je zapotřebí použití látek, které zvyšují pevnost spojení těchto dvou složek. Toho se dosáhne odpovídající předúpravou výztuže apreturou.

Organosilany, které tvoří apreturu, se přidávají do lubrikace, jež se nanáší při dalším zpracování na vlákno, aby se zabránilo jeho poškození abrazí. Obsah lubrikace je asi 1,5%, obsah silanů je méně než 0,05 %. Úprava organosilany je nutná i z toho důvodu, že vlákna ještě před zpracováním na kompozity procházejí procesem textilního zpracování. Apretura a další funkční materiály představují vrstvu mezi povrchem vlákna a matricí, proto často hovoříme o mezivrstvě nebo mezifázi. Zdánlivě je tvořeno spojení mezi povrchem vlákna a matricí apreturou, pomocí dvojstranné chemické vazby, ve skutečnosti o tom lze pochybovat, protože např. působením vody dochází ke změknutí spojení.[7]

U polymerních kompozitů se matrice dělí na termosetickou a termoplastickou. Nás budou hlavně zajímat termoplastické matrice, které z důvodů recyklace výztuže jsou pro nás výhodnější. Důležitou roli zde hraje viskozita matrice a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin.

Původně se pro kompozitní materiály používaly pouze vyztužené nenasyčené polyestery (UP-R) nebo epoxidové (EP-R) pryskyřice. Tyto reaktivní pryskyřice tvoří i dnes většinu kompozitních aplikací. Mají tu přednost, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a většinou při normální teplotě v tekutém stavu. I v případě že jsou zpracovány ve formě taveniny, je jejich viskozita nižší než viskozita taveniny termoplastů. Viskozita reaktivních licích pryskyřic se pohybuje při teplotě zpracování řádově ve stovkách mPa.s, zatímco u termoplastů dosahuje hodnot 10^3 až 10^5 mPa.s., jak je uvedeno v tabulce 4, [7]. Z tohoto důvodu se termoplasty hůře zpracovávají než termosety.

Tabulka 4-Porovnání viskozit termoplastových tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách. [7]

MATRICE	Teplota zpracování	Viskozita při teplotě zpracování
Nevyztužená nenasyčená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za studena	10 až 40 °C	stovky mPa · s
Nenasyčená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za tepla (např. SMC pasta)	≈ 140 °C	≈ 1 000 mPa · s
Nevyztužená epoxidová pryskyřice (EP-R) vytvrzovaná za tepla	např. 130 °C	stovky mPa · s
Polypropylen (PP)	200 až 270 °C	10 ³ Pa · s
Polyéteréterketon (PEEK)	≈ 350 až 400 °C	10 ³ až 10 ⁴ Pa · s

1.4.1 Mechanické vlastnosti vybraných polymerních matric

Základní vlastností termosetů je skutečnost, že zůstávají v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jejich odolnost vůči tečení a vyšším teplotám. V procesu vytvrzování dochází ke vzniku tuhé prostorové polymerní sítě. U konstrukčních aplikací vláknových kompozitů tento typ matric převládá.[4] Mechanické vlastnosti u typických termosetů jsou uvedeny v následující tabulce. [11]

Tabulka 5-Mechanické vlastnosti vybraných termosetů. [11]

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

Kde: ρ je hustota, E_t je modul pružnost v tahu, σ_{Pt} je pevnost v tahu, ε_{f-krit} , je tažnost.

Termoplasty jsou po vytvrzení tuhé látky, které měknou a tečou při zvýšení teploty nad teplotu kritickou. Po ochlazení opět ztuhnou. Charakteristikou struktury jsou dlouhé lineární molekuly vytvořené opakováním stejných stavebních jednotek. Nevýhodou je velká viskozita při zpracování, která je o 2-4 řády větší než u termosetů, což přispívá ke vzniku defektů, jako jsou například bubliny, nesmočené pramence vláken. Zlepšení se dosáhne použitím termoplastem předimpregnovaného vlákna, což ale zvyšuje konečnou cenu. Výhodou je vysoká tažnost. Matrice z termoplastů převládají u plněných plastů a částico-

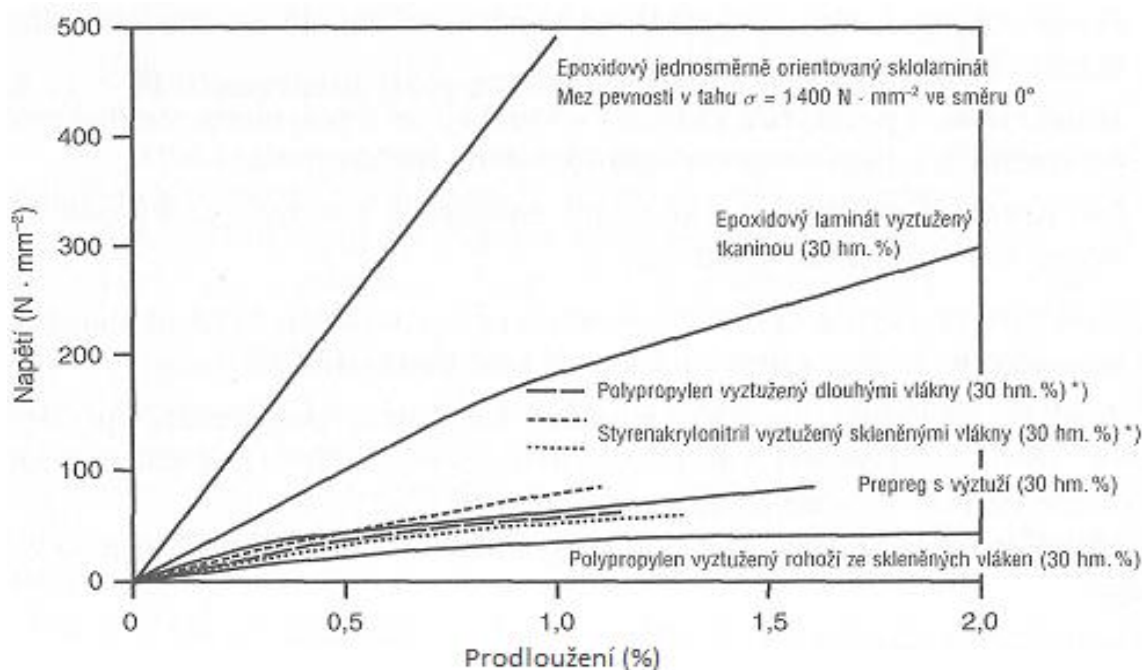
vých kompozitů [4]. Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů jsou uvedeny v tabulce 6, [11]

Kde: ρ je hustota, E_t je modul pružnost v tahu, σ_{Pf} je pevnost v tahu, $\varepsilon_{m,krit}$ je tažnost.

Tabulka 6-Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů. [11]

MATERIÁL	ρ	E_t	σ_{Pf}	$\varepsilon_{m,krit}$
	10^3 kgm^{-3}	GPa	MPa	%
Polypropylen	0,9	1,1-1,5	28-41	10-700
Polyamid	1,42	2,8-2,4	76-83	60-300
Polykarbonát	1,21	2,1-2,8	62-76	110-130
Polyether	1,31	3,8	70	50-130

Pro lepší představu zde lze uvést ještě diagram napětí na prodloužení u vyztužených kompozitů s termosetickou a termoplastickou maticí znázorněný na obrázku 14.[7]



Obrázek 14-Diagram napětí-prodloužení u vyztužených kompozitů s termoplastickou a termosetickou maticí. [7]

1.4.2 Termosetické matrice

Reaktivní pryskyřice tvoří skupinu termosetů nejčastěji používanou při výrobě kompozitů. Jsou to kapalně nebo tavitelné pryskyřice, které se buď samovolně, nebo za pomoci tvrdidel tj. iniciátorů, katalyzátorů, urychlovačů, aldehydů apod. – vytvrzují polyadici nebo polymerací bez odštěpení těkavých složek. Reaktivní pryskyřice nazýváme také: licí, lamináčnické, impregnační, prosycovací nebo zalévací (elektro) pryskyřice.

Mezi nejdůležitější typy reaktivních pryskyřic patří: [7]

- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)-jednou jejich složkou je karbovová kyselina (většinou vícesytná) a nejméně jednou další složkou je alkohol (nejčastěji vícemocný). Pryskyřice je rozpuštěna v monomerním rozpouštědle (často ve styrenu), se kterým je kopolymerizovatelná.
- Vinylesterové (VE-R) nebo Fenakrylátové (PHA-R) pryskyřice z fenylových nebo fenylenových derivátů – jako koncovou skupinu řetězce mají esterifikovanou kyselinu akrylovou. Pryskyřice je rozpuštěna v monomerním rozpouštědle (často ve styrenu), se kterým je kopolymerizovatelná.
- Epoxidové pryskyřice (EP-R) – obsahující dostatečné množství epoxidových skupin potřebných pro vytvrzení
- Fenylické pryskyřice – vyrábějí se kondenzací fenolů a vodných roztoků aldehydů.
- Metakrylátové pryskyřice (MA-R) – vyrábí se z polymerizovatelné směsi polymerických a monomerních esterů kyseliny metakrylátové.
- Izokyanátové pryskyřice – obsahují dostatečné množství izokyanátových skupin potřebných pro vytvrzení.

Termosetické kompozity se rozlišují podle toho, zda obsahují:

- nepravidelně rozdělená krátká vlákna délky 6 až 75 mm, např. BMC (Bulk Moulding Compound) – polyesterová lisovací hmota vyztužená 6 až 12 mm dlouhými skleněnými vlákny, která je vhodná pro lisování nebo vstřikování
- Tkaniny a rohože prosycené pryskyřicí, např. lamináty vyztužené tkaninou nebo rohoží, které se zpracovávají ručním kladením nebo injekční technologií. Tyto technologie se využívají pro malosériovou výrobu velkoplošných dílů, mohou to být např. čluny, rotorové lopatky větrných elektráren aj.



Obrázek 15-Výroba lopatky větrné elektrárny Siemens o výkonu 6 MW. [24]

1.4.3 Termoplastické matrice

Výhodami termoplastických matric jsou lepší mechanické vlastnosti a zlepšení hygienických podmínek výroby, protože se během ní nepoužívají rozpouštědla a jiné dráždivé chemikálie. Schopnost recyklace je také oproti termosetům vyšší. Většímu rozšíření termoplastických kompozitů brání omezené výrobní možnosti dané náročnou technologií, natavování za vysokých teplot a cena výchozích polotovarů. Z technologií, které je možno použít pro termoplastickou matici je prakticky možné jen zpracování deskových polotovarů různých rozměrů lisováním např. GMT nebo LFT, prepregů při navíjení a při pultruzi.

Pro řadu aplikací v různých oblastech jako je letecký průmysl, stavebnictví, automobilovém i vojenském průmyslu se jako matrice používají: [12]

- PP - polypropyleny
- PA - polyamidy
- PET - polyethyltereftalát
- PBT - polybutyltereftalát
- PSU - polysulfon
- PPSU - polyfenalensulfon
- PESU - polyethersulfon
- PPA (PA6T/66, PA6T/6I) - polyphthalamid, T - tereftal, I - izoftal

- PEI - polyetherimid
- PAI - polyamidoimid
- PPS - polyfenylensulfid
- LCP - aromatické kopolyestery - polymery s kapalnými krystaly
- TPI - aromatické termoplastické polyimidy
- PEEK, PEK, PEKK, PEKEKK - polyaryletherketony
- PLA, PHA, PHB, MAP - bioplasty

Polymerní kompozity se neskládají jen z matrice a plniva, ale je v nich řada aditiv, stabilizátorů, kompatibilizátorů a pigmentů. Plniva přímo ovlivňují hustotu, tuhost a viskoelastické chování polymerních kompozitů. Aditiva nemají vyztužující funkci, ale mají omezit nežádoucí vlastnost nebo ji vylepšit, či dokonce získat novou vlastnost matrice kompozitu.

1.4.4 Rozdíly mezi vyztuženými termoplasty a termosety

Termoplasty se liší od termosetů zpracovatelskými i uživatelskými vlastnostmi, ale vzhledem k velkému počtu různých materiálů jako matrice je jejich všeobecné porovnání velmi obtížné.

Termosety jsou v počátečním stavu nízkomolekulární látky, a proto jsou za normální teploty nízkoviskozní, takže dobře smáčejí a prosycují vlákna výztuže. Musí se nejprve chemicky vytvrdit, aby dosáhly konečné struktury.

Termoplasty jsou za normální teploty pevné látky a teprve při dodání tepelné energie k zahřátí na teplotu většinou nad 200°C jsou dostatečně tekuté. Použití rozpouštědel pro snížení viskozity termoplastů je problematické, protože i po odstranění rozpouštědla zůstává u termoplastů snížená odolnost proti korozi při napětí.[7]

Zatímco se vyztužené termoplasty mohou zpracovávat a tvarovat pouze po zahřátí nad teplotu roztavení, převládá u reaktivních pryskyřic proces chemického vytvrzení, spojený se vznikem reakčního tepla. Vlastnosti matrice musí vyhovovat kritériím tvarovatelnosti a chemického vytvrzování.

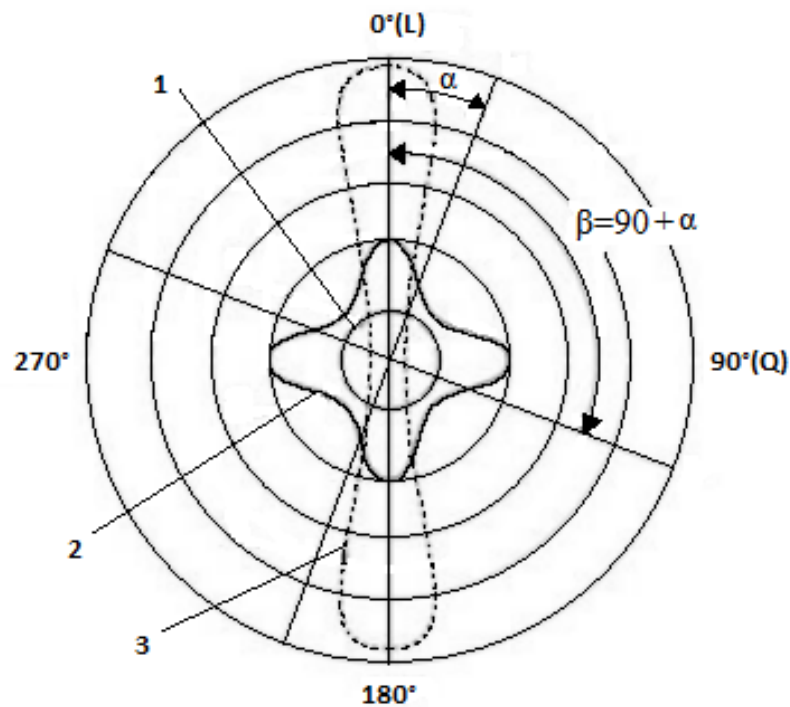
Zpracování reaktivních pryskyřic i termoplastů se provádí obvykle lisostříkem při zvýšené teplotě, je nutné oba procesy ukončit chlazením.[7]

Tabulka 7-Některé rozdíly mezi vyztuženými termoplasty a termosety. [7]

	Termoplasty	Termosety
Matrice	Polymerovaná, vysokoviskozní tavenina, špatně se spojuje lepením	Nevytvrzená, nízkoviskozní, dobře se spojuje lepením a opatřuje nátěrem
Cena matrice	Nízká, ale i vysoká	Nízká
Předimpregnace	Obtížné smáčení a prosycování	Snadné
Cena předimpregnace	Vysoká	Nízká
Skladování	Neomezeně skladovatelné	Omezená skladovatelnost (v chladu), reakce pomalu pokračuje
Polotovar	Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží (GMT), pásy	Lisovací hmoty SMC (prepregy)
Přímé zpracování	Granulát (krátká vlákna), přímo zpracovatelný dlouhovláknitý polotovar (D-LFT)	Výztuž a reaktivní pryskyřice
Teplota při zpracování	Teplota taveniny	Teplota okolí
Tvarování	Vhodné pro velké série	Nevhodné
Ruční kladení	Nevhodné	Vhodné pro velkoplošné díly
Kladení pásů	Vysoká automatizace, malá lepivost, svařování	Vysoká automatizace, dobrá lepivost, citlivé vytvrzování
Teplota nástroje při lisování	Teplota taveniny 150 až 180 °C	Reakční teplota 140 až 160 °C
Lisovací tlak	GMT: 200 až 300 N · mm ⁻² D-LFT: 30 až 100 N · mm ⁻²	SMC: 20 až 50 N · mm ⁻²
Plocha povrchu	Přiměřená, svařitelná	Dobrá, tvrdá; lze ji lepit a natírat
Mechanické chování	Houževnaté, sklon ke křípu	Dynamicky zatížitelné, křehký lom
Chování za tepla	Výrazné změknutí při T_g	Méně závislé na teplotě
Stárnutí	Málo odolné až odolné	Velmi odolné proti stárnutí
Možnost opravy	Omezená	Dobrá

1.5 Polární diagram

Polární graf je závislost dané hodnoty (veličiny) na úhlu ($0-360^\circ$), čehož se hojně využívá nejen v elektrotechnice například vyvažovací diagramy reproduktoru, charakteristiky svítivosti aj. Tento druh grafického vyhodnocení je vhodný i pro kompozitní systémy při porovnávání různého křížení vrstev na jeho pevnost v tahu. Polární diagram je graf pro speciální zobrazení hodnot, které mohou vykazovat cykličnost nebo u nichž záleží na směru. Při konstrukci polárního grafu je pro zobrazení jednoho bodu potřeba dvou údajů o velikosti a úhlu od počátku. [23]



**u laminárního kompozitu: 1. rohožového
2. tkaninového
3. jednosměrného**

L - podélný směr (u tkaniny směr osnovy)
Q - kolmý směr (u tkaniny směr útku)

Obrázek 16-Polární diagram laminárního kompozitu. [23]

1.6 Technologie výroby

V současné době se používá přibližně 14 různých technologií výroby, které jsou založené na principech lisování, navíjení, tažení a stříkání popřípadě vstřikování u krátkovláknových kompozitů. Metody se zejména liší typem zpracovávaného pojivového systému matrice, produktivitou práce, dosaženým objemovým podílem vláken, stupněm automatizace, výchozím polotovarem, tvarovými možnostmi (desky, dutá tělesa, složité prostorové výrobky) a stupněm reprodukovatelné kvality.

Důležitou charakteristikou každé výrobní technologie je dosažitelný objemový podíl vláken v kompozitu. Čím je tento podíl vyšší, tím je laminát únosnější. Toto obvykle platí do objemového podílu cca 70%

Tabulka 8-Srovnání výrobních technologií dle dosaženého objemového podílu vláken. [13]

Výrobní technologie	objemový podíl vláken v laminátu [obj.%]
pultruze	43 - 83
ovíjení (pletení)	25 - 65
navíjení	45 - 65
RTM	25 - 65
lisování	30 - 50
lisování polotavaru GMT a SMC	15 - 40
pokládání prepregů (autokláv)	50 - 70
stříkání	18 - 35
ruční laninace	10 - 38

1.6.1 Základní technologie výroby kompozitů s termosetickou maticí

- **Metoda ručního kladení**

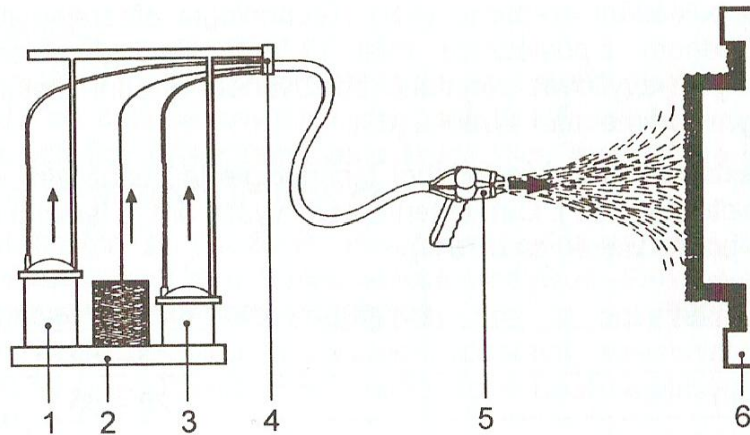
V oblasti výroby prototypů je ruční kladení nenahraditelnou metodou. Její nespornou výhodou jsou jednoduché pomůcky a v podstatě neomezené tvarové možnosti výrobků. Na naseparovanou formu se kladou podle potřeby tkaniny nebo rohože z různých vláken, které jsou prosycené iniciovanou pryskyřicí. Prosycení se provádí válečky, štětcem nebo oblými stěrkami na rovném povrchu. Nejoblíbenější jsou pojivové systémy s vytvrzováním za studena. Tak odpadá nutnost řízeného ohřevu v peci.

Pro zvýšení objemového podílu vláken v laminátu a tím i jeho kvality se v praxi často používá vakuum. Vzduchotěsná forma se vytvoří jednoduše přilepením krycí folie na těsnící pásku podél laminovaného výrobku. Přebytečná pryskyřice včetně vzduchových

bublin jsou odsáty do speciální tkaniny s vysokou nasákavostí. Tato technologická vrstva se po vytvrzení od spodního laminátu snadno odtrhne.

- **Strojní stříkání**

Na formu je ručně nebo strojně nanášena tlakovým vzduchem směs pryskyřice a sekaných vláken. Po nanesení jedné vrstvy se provádí válečkování, aby byla vytlačena přebytečná pryskyřice [8]

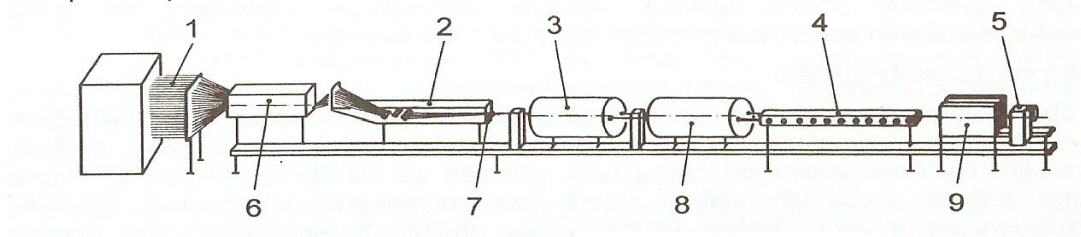


1-pryskyřice s urychlovačem, 2-roving, 3-tvrdidlo, 4-zdvihadlo, 5-stříkací pistole s řezačkou a dvěma tryskami, 6-forma

Obrázek 17-Princip strojního stříkání. [8]

- **Pultruze**

Pultruzní technologie výroby profilů patří mezi nejstarší technologie vláknových kompozitů. Pramence vláken po průchodu pryskyřičnou lázní vstupují do tvarového průvlaku, kde vlivem vyšší teploty dochází k vytvrzování jak je vidět na obrázku 18. Někdy se vedle pramenců používají tkaniny. Běžná rychlost odtahu je $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ [8],[7]

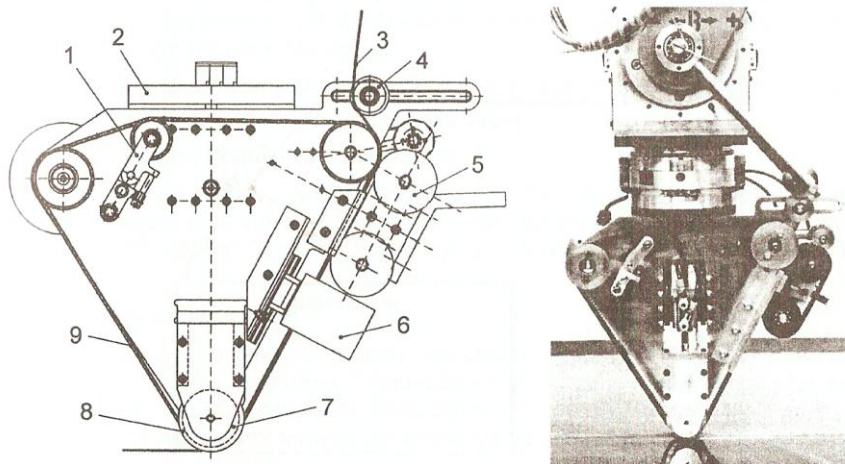


1-pramence vláken, 2-pryskyřičná lázeň, 3-vytvrzovací pec, 4-chladicí trať, 5-řezačka,
6-vysoušení, 7-tvarový průvlak, 8-temperovací pec, 9-odtahové zařízení

Obrázek 18-Princip tažení (pultruze). [8]

- **Pokládání prepregů s vytvrzením v autoklávu**

Použití prepregu s vysokým a konstantním podílem vláken zaručuje výrobu velmi kvalitní a tvarově komplikovaných výrobků pro nejnáročnější aplikace. Přířezy prepregu se podle navržené skladby naskládají ručně nebo robotem na formu. Princip konstrukce jednoduché pokládací hlavice portálového robotu je na obrázku 19. Po naskládání všech vrstev prepregu se celý výrobek vloží do vaku z vysokotažné folie s technologickými vrstvami pro odsátí přebytečné pryskyřice při vytvrzování. Vytvrzování probíhá v autoklávu, velké tlakové nádobě s ohřevem, při současném působení teploty, přetlaku a vakua. Vytvrzovací cyklus s průběhem teploty, tlaku a vakua udává výrobce prepregu. [8]

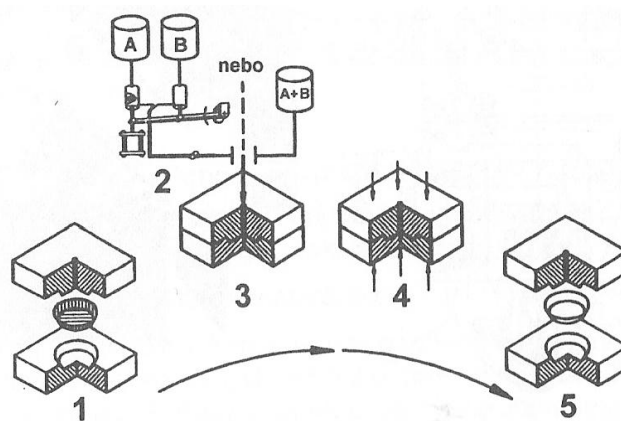


1-napínání ozubeného řemenu, 2-připojení k portálovému robotu, 3-přířuv prepregu,
4-vodící kladka, 5-přítlačná kladka, 6-řezačka prepregu, 7-prokládací kladka,
8-snímač rychlosti pokládání, 9-ozubený hřeben pro rovnoměrný posun materiálu

Obrázek 19-Princip konstrukce jednoduché pokládací hlavice portálového robotu. [8]

- **Injekční vstřikování RTM / RIM**

Důležitým znakem injekčního vstřikování je výroba dílů v jednom kroku. Při výrobě metodou RIM (Resin Injection Moulding) je připravený slisovaný vláknový polotovár umístěn v požadovaném tvaru do uzavřené dvojdišné formy a pod tlakem prosycen pryskyřicí s nízkou viskozitou. Po tomto kroku následuje vytvrzení za zvýšené teploty. U RTM (Resin Transfer Moulding) je vytvrzování obohaceno o lisování. Technologie Advanced RTM využívá navíc vakuum.



1-vložení předlisovaného vláknového polotovarů, 2-míchání pryskyřice a tvrdidla, 3-injektování iniciované pryskyřice, 4-vytvrzování při zvýšené teplotě, 5-vyjmutí z formy

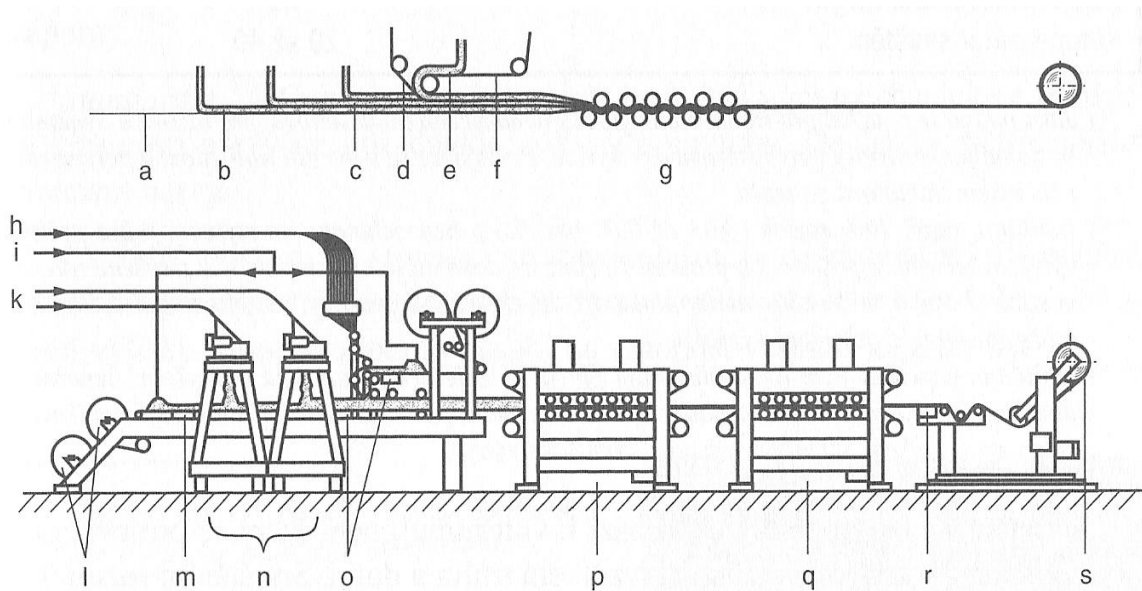
Obrázek 20-Princip RTM. [8]

Je známá celá řada modifikací metod RIM a RTM, které se liší dobou cyklu, tvárovými schopnostmi, kvalitou povrchu dílu, dosaženým objemovým plněním vláken a investičními náklady. Mezi další varianty RTM patří TERM (Thermal Expansion Resin Transfer Moulding) a jiné. [8]

- **Lisování SMC**

Lisování SMC (Sheet Moulding Compounds) je vhodná výrobní technologie pro výrobu velkoplošných dílů s dobrými mechanickými vlastnostmi, protože tento materiál podobně jako prepregy obsahuje dlouhá vlákna. Doba výrobního cyklu je navíc srovnatelná s vstřikováním plastů.

Plošné lisovací materiály typu prepregu SMC se připravují ve formě polotovaru na speciálním zařízení. Nekonečné pramence se sekají v sekacím zařízení na délku 25 nebo 50 mm a nanášejí se na nosnou fólii, pokrytou vrstvou směsi pryskyřice a plniva. Horní povrch se přikryje obdobně upravenou folií. SMC prepregy se zpracovávají na výrobky převážně ve vyhřívaných ocelových formách na hydraulických lisech. [7]

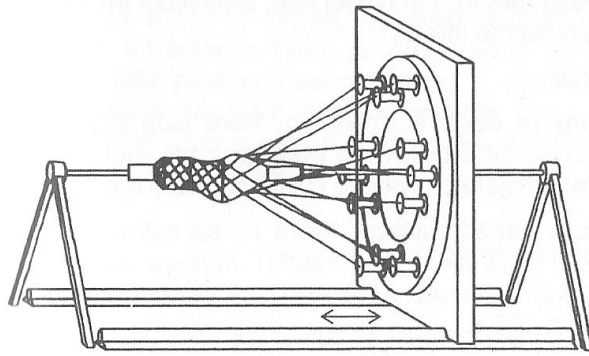


a,e-nekonečný pás polyethylenové fólie, b-směs pryskyřice a plniva, c-sekané skelné vlákno, d-nekonečné skleněné vlákno, f-polyethylenová fólie, g-prosycovací válečky
 lisování a homogenizace: h-nekonečné skleněné vlákno, i-směs pryskyřice a plniva, k-skleněné pramence pro sekací zařízení, l-zásobník fólií, m,o,r-siloměry, n-řezačka okrajů, p,q-prosycovací zařízení, s-navíjecí zařízení

Obrázek 21-Zařízení na výrobu SMC prepregů. [7]

- **Odvíjení a pletení**

Textilní technologie odvíjení a pletení umožňuje vyrábět prostorové pleteniny trubkovitého tvaru jak je vidět na obrázku 22. V kombinaci s RTM nebo technologií přesného navíjení mohou vznikat komplexní kompozitní díly. Za použití této technologie nevzniká odpad a proto je dobré celý proces automatizovat.

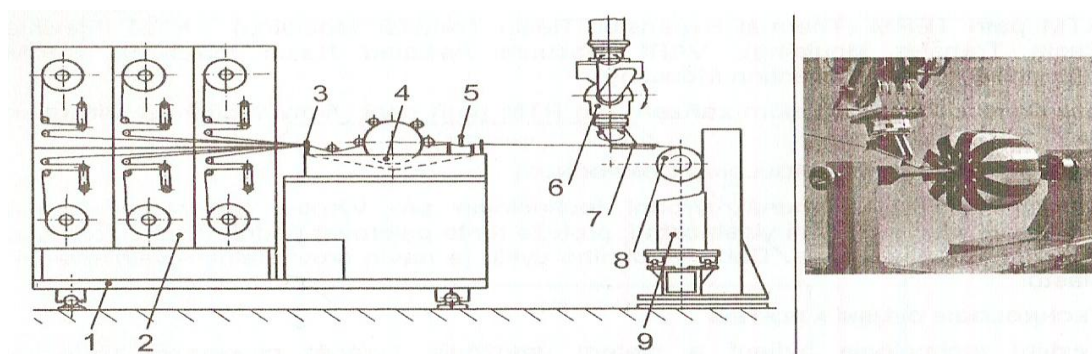


Obrázek 22-Princip horizontálního ovíjení komplexních geometrií. [8]

- **Přesné navíjení**

Při přesném navíjení je roving odvíjen z cívky, smáčen v iniciované pryskyřici a pod požadovaným úhlem navíjen na naseparovaný trn. Po procesu navíjení následuje většinou vytvrzování v peci za zvýšené teploty. Současné profesionální navíjecí stroje umožňují vyrábět kvalitní osově symetrické součásti ve velkých sériích, jako jsou tlakové nádoby, hřídele, duté profily různých tvarů a velikostí. Každé technologické zařízení pro navíjení lze rozdělit na systém přísunu a napínání vláken, impregnační lázeň, systém řízení úhlu náviny a vlastní navíjecí stroj s navíjecím trnem. [8]

První praktickou realizaci navíjecího procesu provedla před 60 lety americká firma Hercules Corporation při výrobě trysky raketového motoru X248 na tuhé palivo s navíjecím strojem z upraveného soustruhu. [8]

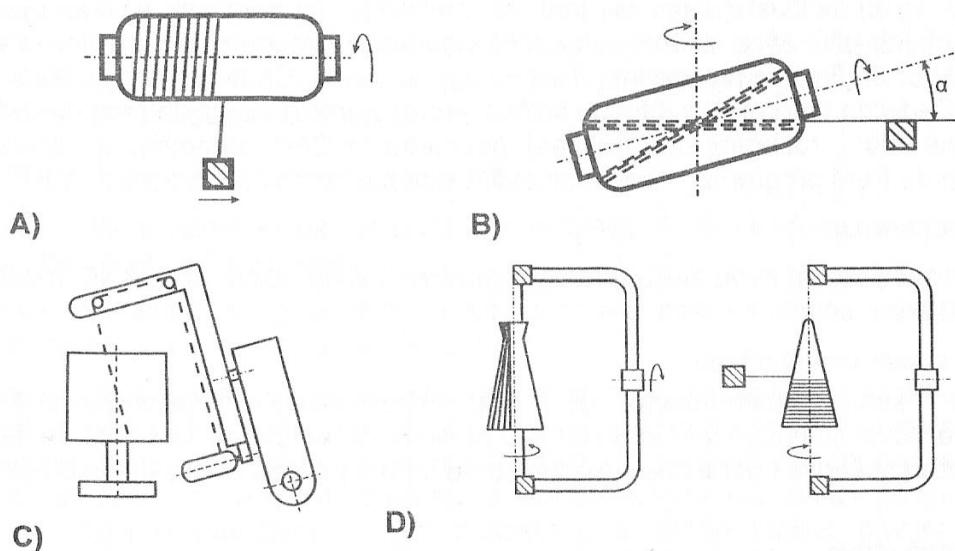


1-vozik, 2-odvíjecí zařízení s cívkami rovingu, 3-vedení vlákna, 4-impregnační lázeň, 5-stírací hřeben-lišta, 6-hlava robotu, 7-navíjecí oko, 8-navíjecí trn, 9-osa navíjecího stroje

Obrázek 23-Princip technologie přesného navíjení. [8]

Profesionální navíjecí stroje jsou dodávány s řídicím programem, který umožňuje navrhnout jakýkoliv návinový vzor a výsledná data přeložit do programu, tento postup urychluje technologickou přípravu a zároveň omezuje vznik chyb. Navíjecí stroje lze rozdělit do tří základních skupin: [8]

1. Stroje soustruhového typu – jsou nejrozšířenější a nejuniverzálnější, protože dovolují využít celý interval úhlu navíjení. V sériové výrobě jsou navíjecí trny řazeny sériově i paralelně. Stroje mají CNC řízení.
2. Planetové stroje – Navíjecí stroje této koncepce se používají pouze pro menší úhly návinu v intervalu od 0 do 15°. Sortiment výrobků se omezuje na součásti namáhané krutem například kardanové hřídele.
3. Stroje „Strickland B” – Velmi zřídka se využívá, umožňuje rychlé navíjení na kuželový trn současně podélným i obvodovým návinem.



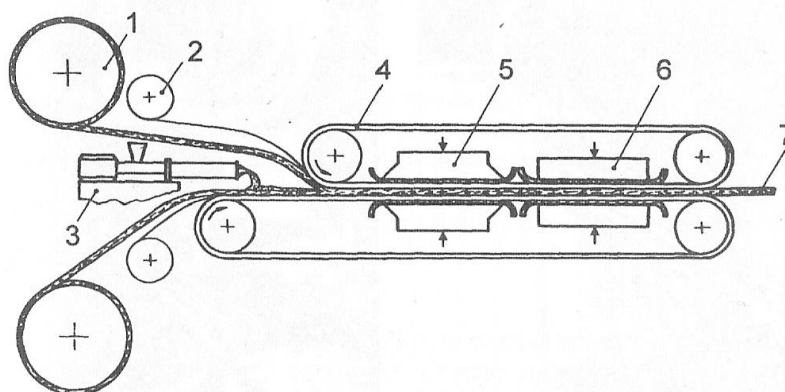
a-soustruhový, b-planetový se šikmo uloženým trnem, c-planetový s rotujícím ramenem, d-navíjecí stroj „Strickland B”

Obrázek 24-Typy navíjecích strojů. [8]

1.6.2 Základní technologie výroby kompozitů s termoplastickou maticí

- Lisování GMT

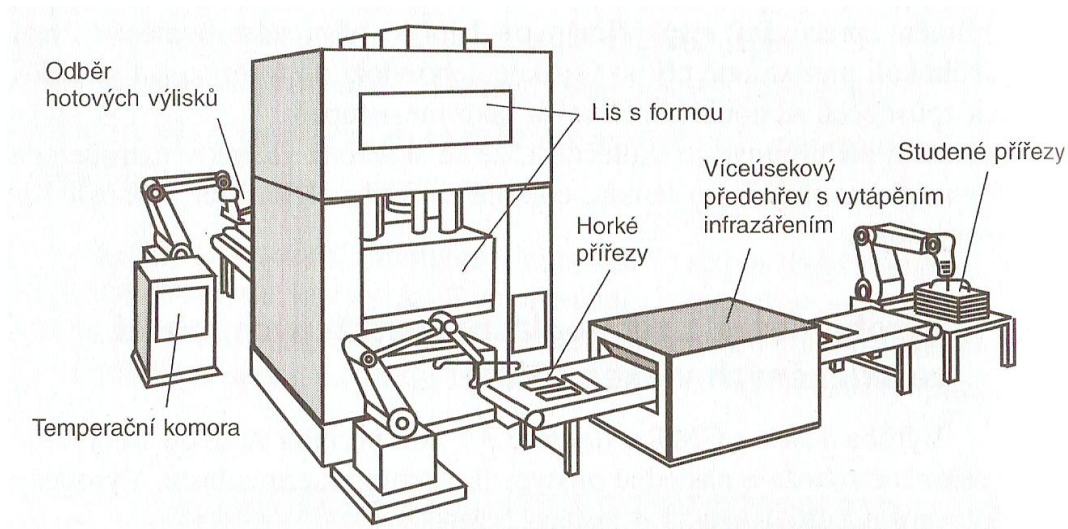
Polotovary GMT se vyrábí spojováním skelných rohoží s krátkými vlákny a termoplastickou fólií. Princip výroby GMT (Glass-Mat-reinforced Thermoplastics) je znázorněn na obrázku 25, zpracování probíhá ve třech krocích. Prvním je ohřev na teplotu tavení termoplastu. Druhým je lisování a třetím krokem je ochlazení. Lisování probíhá ve formách s teplotou temperace v rozmezí 50 až 80°C při tlacích 20Mpa. Proces lze dobře automatizovat. GMT stejně jako SMC nebo LFT se používají pro výrobu plochých dílů s možností umístit žebrování pro zvýšení tuhosti.[8]



1-rohož ze skelných vláken, 2-termoplastická folie, 3-extruder, 4-dvoupásový lis,
5-oblast ohřevu, 6-oblast chlazení, 7-hotový deskový materiál

Obrázek 25-Princip výroby GMT. [8]

Postup výroby GMT dílů je znázorněn na následujícím obrázku. Mezi dvě prošívané rohože ze skelných vláken, proložené v případě potřeby pásy z nekonečných vláken, je nanášen termoplast, který je v prvním úseku prosycuje ve vytápěném pásovém lisu. Pro dosažení požadované kvality povrchu se provádí lisování mezi dvěma fóliemi, které mohou být nahrazeny také extrudovaným termoplastem. V dalším úseku lisu se materiál chladí a formuje. Ve srovnání s výlisky vyztuženými dlouhými nebo krátkými skelnými vlákny vykazují tyto výlisky vysokou izotropii vlastností. Přídavkem jednosměrně uložených vláken je možno dosáhnout požadovaných anizotropních vlastností. Jako matrice se nejčastěji používají PP, PET, PA 6, jako výztuž rohož ze skelných vláken v množství od 30 do 40 hm. %. [7], [8]

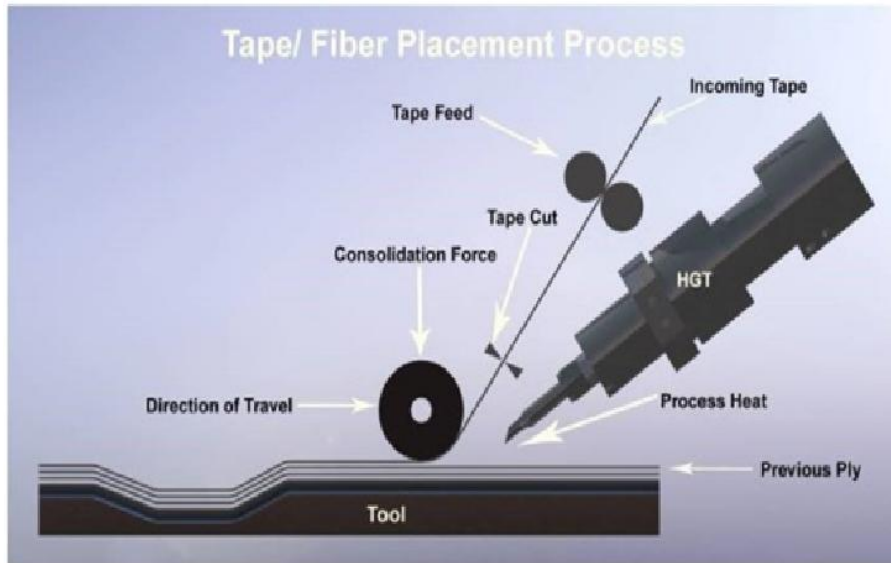


Obrázek 26-Výroba dílů z GMT. [7]

- **Navíjení a pokládání termoplastického prepregu**

Hlavní technologickou výhodou využití termoplastů bez dodatečného procesu vytvrzování, jak je tomu u termosetů, je zvýšení produktivity práce. Při výrobě navíjením dochází v jednom kroku k natavování páska prepregu, k jeho umístění a orientaci na navíjecí trn a k lisování přítlačnou kladkou s následným ztuhnutím pouhým ochlazením. Tento proces je nazýván „in-situ” konsolidace. Při tzv. „ex-situ” konsolidaci je ohřev s natavením a slisováním vrstev laminátu plně oddělen od vrstvení laminátu.

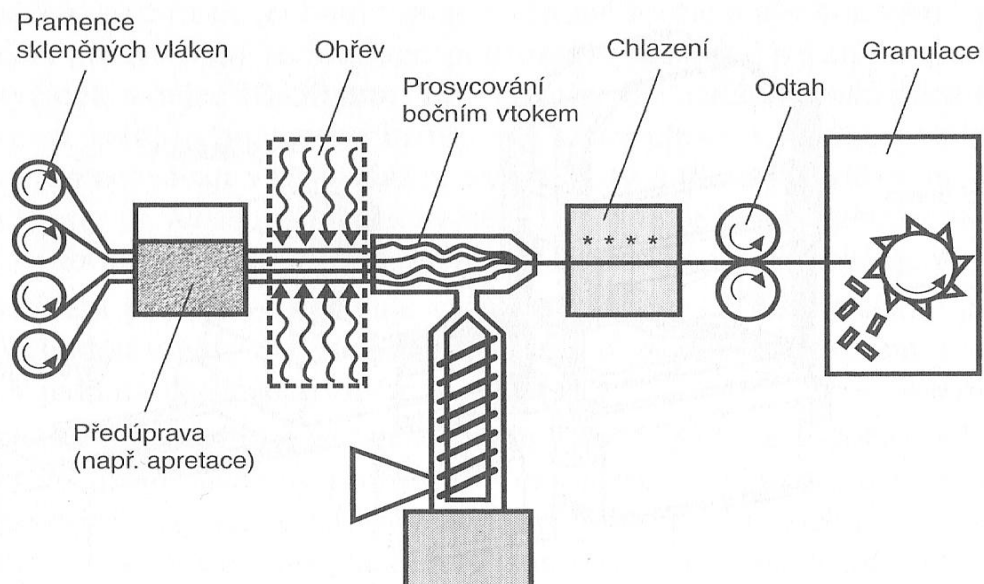
Kontinuální navíjení je tzv. „Fibre-Placement” nebo „Tape Laying”, kdy jedna vrstva laminátu je navinuta nebo kladena z jednotlivých pásků prepregu, který je vždy na začátku navíjecího trnu nebo formy připevněn a na jeho konci uříznut. Při kontinuálním navíjení z nekonečného páska prepregu se vlivem změny směru navíjení vytváří na koncích trnu zesílení, které musí být po navinutí oříznuto. Při „Tape Laying” mohou být páska prepregu pokládány dokonale vedle sebe, což je výhodnější, než kladení s malým přesahem. Vzniklé vzduchové kapsy mohou být zdrojem vzniku trhlin.[8]



Obrázek 27-Pokládání termoplastického prepregu. [24]

- **LFT – termoplasty vyztužené dlouhými vlákny**

LFT se zpracovává třemi různými technologiemi. Obdobně jako termoplasty vyztužené krátkými vlákny se také LFT zpracovávají technologií klasického vstřikování. Při tomto procesu se nejprve vyrobí granulát LFT buď pultruzí nebo extruzí a následně se zpracuje na výlisek technologií lisovstřikováním. [7]



Obrázek 28-Pultruzní zařízení na výrobu LFT. [7]

2 RECYKLACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Po skončení životnosti kompozitního výrobku je nutné materiál určitým způsobem zlikvidovat, ještě lépe recyklovat. Recyklace je především věnována uhlíkovým kompozitům, protože suroviny potřebné na jejich výrobu jsou mnohonásobně dražší, než kompozity vyztužené skleněnými vlákny. Proto se z ekonomického hlediska nevyplatí recyklovat kompozity se skelnými vlákny, neboť investice do technologií převyšuje opětovné nakoupení surovin. Pro opakované zpracování kompozitního materiálu platí, že ani po roztřídění a sběru čistých použitých kompozitních dílů, nemůže být znovu získán materiál, který by odpovídal původnímu. Proto je nutné po recyklaci vzít v potaz, že recyklát nebude mít shodné materiálové vlastnosti. Je tedy potřeba najít takové aplikace kde může být recyklát použit v takové míře, aby našel odbyt na trhu. Každé další recyklování bude snižovat vlastnosti, až se recyklát dostane na kritické minimum, kde bude využito pouze energetické zhodnocení výrobou tepla.

Základním předpokladem nového zpracování kompozitů je sběr a získávání tříděného odpadu. Podniky, které zpracovávají kompozity, musí spolupracovat, protože jenom tak lze dosáhnout účinného opětovného využití materiálu. Například v Německu na základě rozhodnutí výrobců a zpracovatelů byla založena speciální firma Ercom Composites Recycling GmbH v Rastattu. Koncept podniku vychází z předpokladu, že pomocí mobilního drtícího zařízení bude probíhat sběr kompozitního odpadu a ten pak bude dopraven k centrálnímu zpracování. [7].

Přesto, že v dnešní době vznikají nové způsoby recyklace díky ekologickým dotacím, nejsou rozšířeny jako konvenční technologie na recyklaci kompozitů. Mezi ty nejzákladnější a nejrozšířenější patří drcení, dodatečné chemické zpracování a spalování.

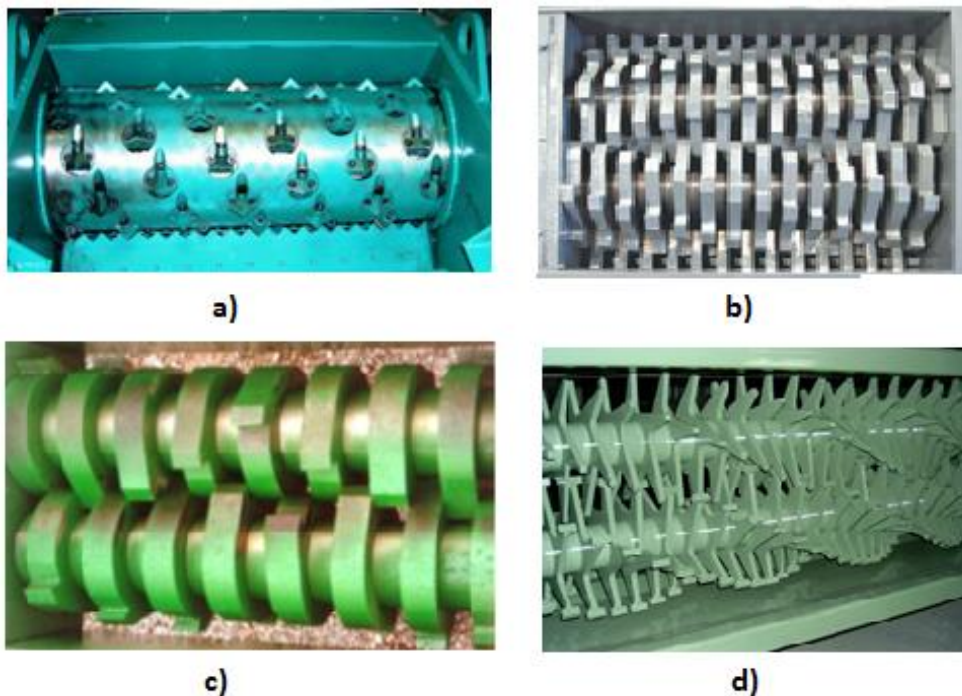


2.1 Konvenční způsoby recyklace kompozitů

2.1.1 Drcení a mletí

Tato metoda je především využívána pro likvidaci sklem vyztužených kompozitů. GFK, respektive nejčastěji používané prepregy nejsou ve vytvrzeném stavu ani znovu tavitelné ani tvarovatelné a musí být před dalším využitím rozdrceny. Jsou složeny přibližně z jedné třetiny z UP-R, anorganických plniv (křída, vápenec) a ze svazků skleněných vláken cca 25 mm dlouhých. Zbytek tvoří pomocné látky. Při recyklování prepregů následuje po hrubém rozdrcení dílů jejich rozemletí v kladivovém drtiči. Výsledkem je drť, která obsahuje několik centimetrů dlouhé svazky skleněných vláken propojených zbytky matrice a zbytky matrice v práškové formě. Takto rozemletý materiál může být použit buď jako plnivo nebo i jako surovina, ve které původní skleněná vlákna mohou znovu vykonávat vyztužující funkci. Tento způsob nazýváme částečnou recyklací. Pokud je materiál použit jako plnivo, může být využito až 20% recyklátu, aniž by došlo k radikálnímu zhoršení mechanických vlastností. Problém ale představuje nedostatečná kvalita nového povrchu, takže je možné recyklát využít pouze na vnitřní, nepohledové prvky.[14]

Příklady mechanismů drtičů s možnostmi použití pro daný materiál jsou vidět na obrázku 29.



Obrázek 29-Mechanismus drtičů. [24]

- a) Pro všechny materiály s výjimkou kovů, menší výkon, možnost nastavení velikosti drtě od 6-50 mm.
- b) Papír dřevo plasty a jiné podobné materiály.
- c) Polystyren, Polyuretanové desky.
- d) Pneumatiky, hadry, olejové filtry a jiné.

2.1.2 Chemické zpracování

Tento způsob se osvědčil pro materiály vyztužené uhlíkovými vlákny. Chemické zpracování kompozitních materiálů může probíhat pomocí hydrolyzy (rozklad materiálu matrice v prostředí vodní páry), hydrogenací (rozklad ve vodíkové atmosféře) a pyrolýzy (tepelný rozklad matrice). Ze všech postupů lze získat recyklát uhlík, ale existují zde mnohá negativa - především s působící teplotou a chemikáliemi se rapidně zhoršují vlastnosti vláken a zároveň je celý proces velice ekonomicky náročný.

2.1.3 Spalování

Jsou metody založené na využití vysokého spalného tepla plastů. Spalování je obecně nejjednodušším způsobem likvidace kompozitního odpadu, kdy se recyklát dostal až na svou kritickou hodnotu a další recyklace nejsou výhodné jak z ekonomického, tak funkčního hlediska. Materiál je využit jako topné palivo pro výrobu energie v něm obsažené. V následující tabulce jsou uvedeny některé specifické spalné teploty běžných plastů a srovnání s konvenčními surovinami, dřevo, uhlí. [15]

Tabulka 9-Specifické spalné teploty [15]

MATERIÁL	Specifické spalné teplo [MJ.Kg ⁻¹]
Polyethylen	46-49
Polypropylen	44-47
polystyren	40-45
Akrylát (koberce, podlahoviny)	24-28
Polyvinylchlorid	21
Polyethylentereftalát	23
Černé uhlí	24
Hnědé uhlí	13
Dřevo	11,5-21

Spalování je složeno z více procesů, které probíhají buď postupně nebo současně.

Spalovací proces zahrnuje pět stupňů:

- Sušení
- Zplyňování
- Zapálení
- Odhořívání
- Vyhoření

Při spalování plastů vznikají více či méně škodlivé toxické spaliny, podle druhu spalovaného plastu. Proto jsou nutné investiční náklady na spalovací zařízení a čištění spalin.

2.1.4 Pyrolýza

Je alternativou ke spalovacímu zařízení. Pyrolýza je termický rozklad organických materiálů za nepřístupu médií obsahující kyslík. Podstatou je rozštěpení makromolekulárních látek na malé molekuly tak, aby se zachovala vazba mezi uhlíkem a vodíkem. To je ohřev materiálu nad mez termické stability přítomných organických sloučenin, což vede k jejich štěpení až na stálé nízkomolekulární produkty a tuhý zbytek. Z technologického hlediska lze pyrolýzní procesy dále rozdělit dle dosahované teploty na: [15]

- nízkoteplotní (teploty pod 500°C)
- středně teplotní (500-800°C)
- vysokoteplotní (teploty nad 800°C)

Pyrolýza k recyklaci termosetových kompozitů používá techniku, která odstraňuje pryskyřici odpařením teplem. Jako vedlejší produkty jsou typické plyny a kapaliny z pryskyřice, které se dále využívají jako paliva, a dále pak jako plniva do jiných materiálů. Problém je v tom, že vysoké teploty potřebné pro tyto procesy buď degradují vlastnosti vláken, nebo vysoké ceny nákladů s procesem spojených přesahují hodnotu produktů získaných. [16]

2.2 Současný stav a výhledy do budoucnosti

Kompozitní materiál je obtížné recyklovat vzhledem k jejich vícefázové povaze, typicky obsahuje tři a více složek: výtuzný materiál vláken, pryskyřice matrice a plniva (např. uhličitan vápenatý). Recyklace termosetových kompozitů představuje obzvláště obtížný úkol, protože jakmile proběhlo síťování matrice, tak už jsou dále nezpracovatelné,

nemohou být roztaveny a reformovány jako termoplastické matrice, které ze své podstaty recyklovatelné být mohou. Protože hodnoty materiálových výtěžností jsou malé, je proto stále málo firem, kterým by se tento business vyplatil.

Jelikož poptávka po kompozitních materiálech stále roste a výhledově stále poroste, musí se otázka recyklace brát v potaz, protože dlouhodobě není možno vyrábět produkty, které se nedají recyklovat. Dříve měl největší spotřebu kompozitů letecký a vesmírný průmysl, ale při vstupu automobilového průmyslu se tyto hodnoty otočily, i když drahá kompozitní vlákna jsou stále používána pouze v luxusních automobilech. Například v průběhu vývoje vozu BMW řady *i* vyvinula společnost BMW Group koncept recyklace komponentů z uhlíkových kompozitů, karosářských dílů a roztříděného odpadu z výroby, který je jako první svého druhu na světě vhodný pro sériovou výrobu. V různých procedurách jsou cenné recyklované materiály z výroby a dokonce i z poškozených či sešrotovaných vozidel znovu použity v automobilové konstrukci a posílány zpět do výrobního procesu, případně použity v jiných aplikacích. V recyklačním procesu se rozlišuje recyklace uhlíkových vláken jako „suchého“ materiálu bez pryskyřice a recyklace kompozitních materiálů, u nichž se jedná o „mokrý“ plasty s pryskyřicí. Suché uhlíkové odřezky vznikající během výroby lze znovu zpracovávat na cenné netkané textilie a znovu používat ve výrobním cyklu. Přibližně deset procent uhlíkových vláken používaných v BMW i3 viz. obrázek 30, pochází v současnosti z recyklace, což je v rámci celosvětového automobilového průmyslu jedinečné. [17]

Při recyklaci kompozitních materiálů – zpracovávání uhlíkových vláken uložených v pryskyřici – je uhlíkový kompozit nejprve průmyslově oddělen ze směsi s ostatními plasty a zpracován například pyrolýzou. Teplo z procesu rozkládání pryskyřice se používá k oddělování nepoškozených uhlíkových vláken. Tato vlákna lze pak používat k výrobě komponentů, aby se snížila potřeba nových vláken. Z takto recyklovaných uhlíkových vláken se vyrábí například panel pod zadním sedadlem. Výsledný produkt splňuje standardy kvality BMW na 100 procent a je o 30 procent lehčí než konvenční konstrukce z plastu vyztuženého skelnými vlákny. Recyklované uhlíkové kompozity nebo uhlíková vlákna, rozemletá či rozřezaná na krátkou délku, se používají také v mnoha oblastech mimo automobilový průmysl, například v textilním či elektrotechnickém průmyslu (materiál pro pouzdra řídicích jednotek). Používání „sekundárních vláken z uhlíkových kompozitů“ je součástí trvale udržitelného materiálového cyklu, který šetří zdroje a zajišťuje suroviny pro budoucí použití. [17]



Obrázek 30-BMW i3. [17]

Efektivní recyklování uhlíkových vláken vyvinuli ve společnosti Siemens, kde z vyřazených kompozitů, tvořených kromě samotných vláken ještě polymerovou maticí, získávají nazpět vlákna výztuže. Během speciálního procesu, při němž jsou kompozity pod tlakem zahřáty na 200 °C, se polymery přeměňují na alkoholy tvořené menšími molekulami, jež se pomocí vody odloučí od uhlíkových vláken. Výhodou metody je nejen nižší energetická náročnost a nulová spotřeba toxických rozpouštědel, ale zejména její šetrnost vůči samotným uhlíkovým vláknům. Ta jsou na konci procesu prakticky netknutá a zachovávají si původní velikost a tvar, včetně nepoškozeného povrchu. Mechanické vlastnosti vláken jsou tedy recyklací ovlivněny naprosto minimálně. Aby však mohla být metoda používána ve větší míře, musí se ještě vyřešit, jak využít recyklovaná vlákna k výrobě produktů a součástek, jež mají jiné rozměry a tvar, než původní komponenty. [18]

Se zvyšováním spotřeby kompozitních materiálů budou vznikat nové metody na jejich recyklování, které budou mít nižší ekonomické a provozní náklady než současné konvenční způsoby recyklace, u kterých se nevyplatí za současných podmínek recyklovat na zisk.

2.3 Výhledová spotřeba

Trh s uhlíkovými kompozity by měl podle nedávného průzkumu, který uskutečnila asociace Carbon Composites, do roku 2020 růst o 10,6 % ročně. Po hospodářském propadu v roce 2009 se trh s materiály z uhlíkových vláken v období let 2010 až 2013 stabilizoval a dosahoval ročního růstu kolem 10 %. Podobně se vyvíjel i trh s plasty tvrzenými uhlíkovými vlákny % ročně. Podle studie Carbon Composites činila v roce 2012 celosvětová spotřeba těchto kompozitních materiálů kolem 72 000 t, což ve srovnání s předchozím rokem znamenalo nárůst o 9,1 %, obchodní obrat dosáhl 9,4 miliardy USD.

Tento trh by měl sílit i v dalších letech. Podle analýzy by měl každým rokem vzrůst o 10,6 %, takže v roce 2020 by roční spotřeba těchto materiálů měla činit 146 000 t a obrat 16 miliard USD. Tahouny tohoto tržního segmentu jsou a v dohledné době stále budou letecký, automobilový a také energetický průmysl (výroba součástek pro větrné elektrárny).

Z hlediska polymerní matrice lze tyto materiály rozdělit na termoplastové a termosetové kompozity, přičemž ty druhé se používají častěji – jejich tržní podíl v současnosti činí 76 %. Zdá se však, že termoplastové kompozity mají to lepší stále ještě před sebou, hrají pro ně totiž jejich velmi dobré vlastnosti, jednodušší výroba, tvárnost, svařitelnost a recyklovatelnost. Co se týče elastomerových matric, ty se zatím používají poměrně málo. Prognóza však předpokládá, že i ty by v budoucnu měly získat na významu. [19]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části této diplomové práce budou stanoveny tyto cíle:

- Návrh kompozitního systému s ohledem na co nejvyšší recyklaci.
- Volba zpracovatelských podmínek pro zvolenou výrobní technologii.
- Výroba prototypu z navrženého kompozitního systému.
- Zhodnocení dosažených výsledku.
- Závěr a diskuse dosažených výsledků.

3 NÁVRH KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU S OHLEDEM NA CO NEJVYŠŠÍ RECYKLACI.

Při samotném navrhování vhodného kompozitního systému jsem volil, s ohledem na co nejvyšší možnou recyklaci, dva nejdostupnější komoditní polymery polypropylen a polyethylen, které jsou dostupné a cenově přijatelné. Pokud bychom použili nějaký jiný druh polymeru, například ze skupiny bioplastů, stal by se kompozit plně recyklovatelný, ale promítlo by se to v celkové ceně výrobku. Pro účely testování dané výrobní technologie nám v dostatečné míře poslouží již zmíněné komoditní polymery. Kompozitní systém by měl být navrhován tak, aby byl „ušit na míru“ pro každý druh výrobku zvlášť, tak aby jeho vlastnosti byly využity na maximum. Při zhotovování prototypu nebude však toto kritérium bráno v potaz, neboť není určena specifikace využití výrobku.

Nejvyšší recyklovatelnosti docílím třemi způsoby:

- 1) Recyklováním celého kompozitního výrobku
- 2) Recyklováním matrice
- 3) Recyklováním výztuže

1) Recyklování celého kompozitního výrobku

Tento způsob recyklace není možný při použití různých druhů pryskyřice, neboť zde nastává problém, že se při recyklování mohou poškodit vlákna a pryskyřice se už znovu použít nedá. V tomto ohledu je termoplast předností, protože jeho zahřátím můžeme získat nazpět jak polymer, tak i výztužná vlákna, která byla použita. Další nespornou výhodou termoplastu je jeho rychlé tavení a tuhnutí, u pryskyřice musíme počkat, než nastane vytvrdnutí a tento proces může být časově velmi náročný.

Recyklace celého dílce může být provedena dvěma způsoby. Prvním je za zvýšené teploty a tlaku, kdy se odstraní matrice, a ta se pak dále recykluje a zbylá výztužná vlákna se opětovně použijí do jiného výrobku. Druhým způsobem je za snížené teploty, kdy se materiál podchladí na teplotu, při které bude snadněji rozdrčen i s vlákny na recyklát, který bude opětovně použit například při technologii vstřikování, lisování nebo protlačování.

2) Recyklování matrice

Recyklace matrice v kompozitním systému může být uvažována pouze tehdy, pokud by se jednalo o jednoduché odstranění této složky ze systému s co nejvyšší výtěžností a za co nejmenší náklady. Proces může být použit tehdy, pokud matrice cenově převyšuje cenu výztužných vláken. To může převážně nastat jen při použití výztuže z přírodních vláken, které se po použití spálí v pecích a jejich energie se dále využívá.

3) Recyklování výztuže

K recyklování výztuže, jak s termoplastickou tak termosetickou matricí, je v dnešní době vyvinuta celá řada technologií, na které je v poslední době brán zřetel. Protože v kompozitním systému vlákna představují důležitou pevnostní část, většinou čím pevnější vlákna, tím je i jejich cena vyšší, je snaha tato vlákna nějakým způsobem zachránit a znovu využít na stejný nebo jiný typ výrobku, kde by našla uplatnění. Pokud jsou vlákna v termoplastické matrici, je jejich recyklování jednodušší, než pokud bychom se snažili recyklovat vlákna v kompozitu na bázi pryskyřice.

3.1 Návrh kompozitního systému

Na základě zjištěných informací v oblasti kompozitních systémů z oblasti recyklace bylo zvoleno řešení s termoplastickou matricí. Do této skupiny připadá mnoho druhu polymerů, které by se daly využít v systému s vyšší recyklovatelností. U kompozitního systému byl kladen důraz na jeho jednoduché uvedení do plastického stavu a jednoduché a dostupné technologie zpracování.

Kompozitní systém je složen z:

- materiálů matrice
- materiálu výztuže

3.1.1 Volba materiálu matrice

V současné době je na trhu dostupná celá řada různých druhů polymerů, které se liší nejen vlastnostmi a cenou, ale i stupněm recyklace. S toho nám plyne, že nejlépe recyklovatelné budou matrice, které již mají zastoupení na trhu ve vysoké produkci a tím i stupeň recyklace je vysoký. Na těchto základech byli zvoleni ze skupiny komoditních plastů výše uvedení reprezentanti polyethylen a polypropylen, které jsou pro účely zhotovení prototypu dostačující.

Polyethylen je v současné době nejpoužívanějším polymerem na světě. Jeho roční produkce je odhadována na více než 60 milionů tun. Polyethylen má dva základní druhy LDPE s nízkou hustotou a HDPE s vysokou hustotou, ten má vysoký stupeň krystality, což způsobuje jeho vysokou chemickou odolnost proti rozpouštědlům. HDPE se využívá při výrobě kompozitního materiálu na bázi dřeva tzv. woodplastic, který se využívá jako náhrada dřeva.

Zvolen byl polyethylen HDPE 25055E ve formě granulí. informace viz. příloha 1.

Polypropylen patří do skupiny polyolefinů, které se řadí mezi nejběžnější plasty, jsou využívány v potravinářství, textilním průmyslu a jiných odvětvích. Polypropylen je odolný vůči olejům, organickým rozpouštědlům a alkoholům. Roční produkce je odhadována na 30 milionů tun.

Zvolen byl polypropylen TATREN IM 22 63 ve formě granulí. informace viz. příloha 1.

3.1.2 Volba materiálu výztuže

Termoplasty mají špatnou přilnavost k uhlíkovým vláknům, a tak je jejich volba nevhodná pro náš účel. Za podmínky recyklovatelnosti mohou být brány v potaz skelná vlákna a přírodní vlákna, pro náš účel jsou vybrány výztuže ze skelných vláken. Technické informace jsou uvedeny v příloze 1. a přírodní vlákna z juty o plošné hmotnosti 305g/m^2 . Z vláken se splétají příze, ze kterých se vytvoří textilie s různou vazbou. Každá vazba má jiné vlastnosti a je vhodná pro jiné podmínky, pro které ji lze využít a v neposlední řadě má i specifický design.

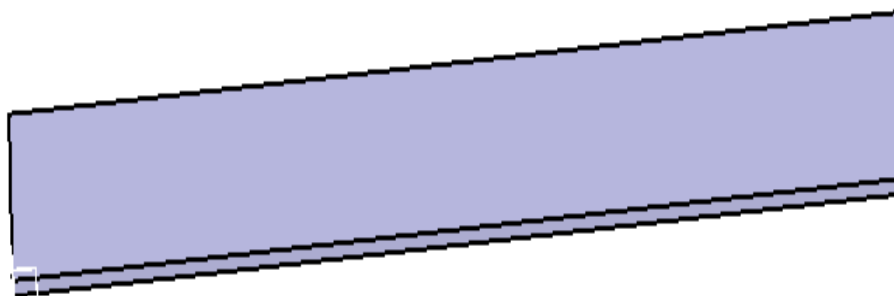


Obrázek 31-Druhy vazeb. [24]

Pro vytvoření prototypu a následné základní mechanické zkoušky je ideální základní plátňová vazba, kde se vazné body střídají tak, že tvoří souvislé diagonály ve dvou směrech. Tato vazba je zároveň nejjednodušší, nejhustší a nejpevnější.

3.1.3 Návrh prototypu

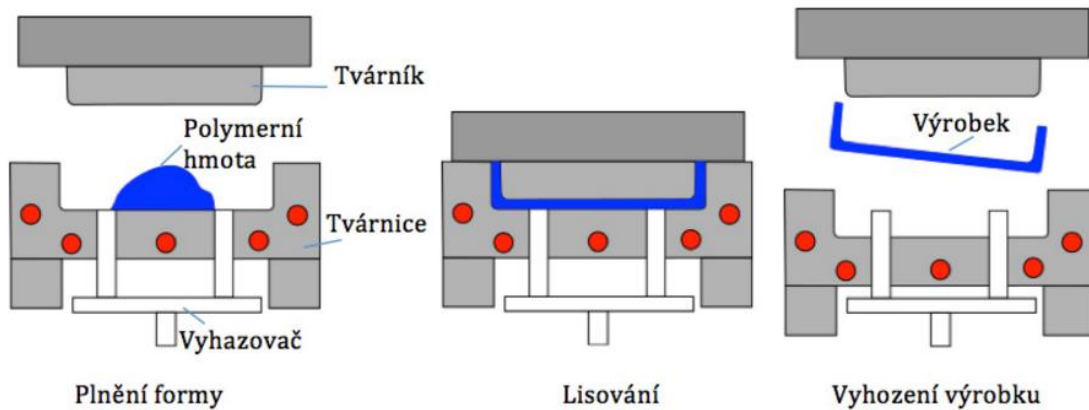
Abychom mohli nějak hodnotit výsledné vlastnosti, bude zapotřebí vytvořit několik zkušebních těles pro zkoušku v tahu a ohybu dle doporučení normou ČSN EN ISO 527. Cílem tedy bude vytvořit desku libovolné tloušťky podle množství použitých vrstev tkanin tak, aby se daly následně z desky zhotovit zkušební tělesa.



Obrázek 32-Návrh desky pro výrobu zkušebních těles

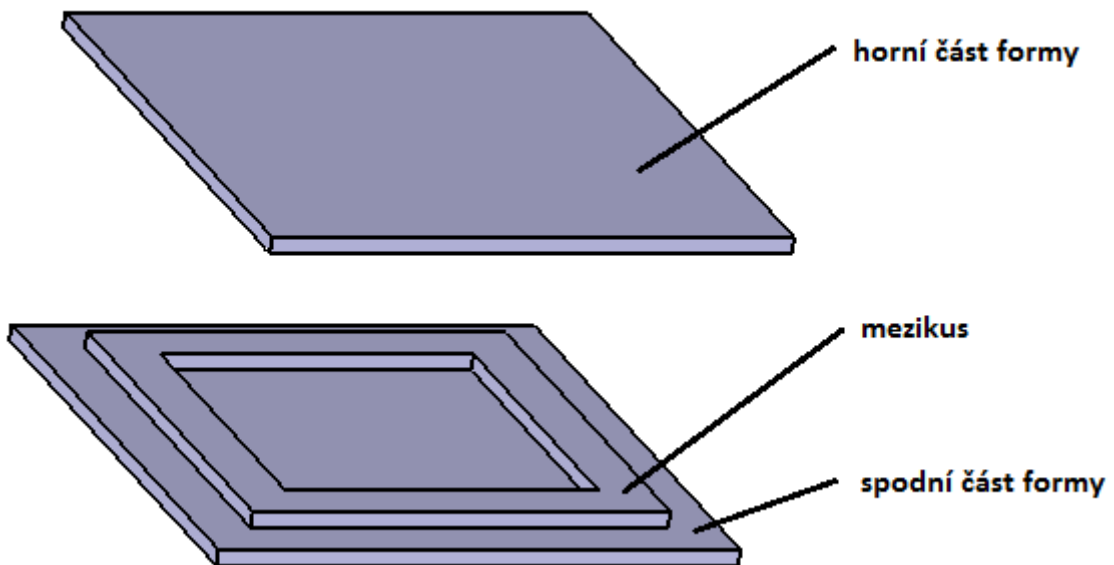
3.2 Technologie výroby lisováním

Lisování je nejstarší způsob tváření plastů. Tváří se ve vytápěné formě, nejčastěji ocelové, kdy se na materiál působí tlakem pro dosažení požadovaného tvaru. Lisovací formy jsou vytápěny elektrickým odporovým topením na teplotu lisování, což je vlastně teplota lisovací formy. Teplota bude záležet na druhu použitého termoplastu a tloušťce desky. Základní technologické parametry při lisování jsou lisovací tlak, teplota, doba lisování a čas potřebný k ochlazení.



Obrázek 33-Technologie lisování. [20]

Pro vytvoření prototypu nám postačí zhotovit lisovací formu ve tvaru dvou přitlačných desek, které by tvořily spodní a horní část formy a případný mezikus by tvořil dutinu formy, jak je naznačeno na obrázku 34.



Obrázek 34-Návrh lisovací formy.

- pro správné zaplnění formy nám bude stačit spočítat objem dutiny mezikusu:

$$V = a \cdot b \cdot t \quad (2)$$

kde a a b jsou délky stran a t je tloušťka mezikusu

- pak hmotnost polymeru spočítáme:

$$m_p = \rho \cdot V \quad (3)$$

kde m_p je hmotnost polymeru, ρ hustota, V objem

Jak se budou postupně vkládat vrstvy tkanin do dutiny mezikusu, tak se objem V bude zmenšovat o objem vložené výztuže.

3.3 Přípravné operace

3.3.1 Stříhání vláken

Pro samotné sestavení prototypu je zapotřebí nastříhání výztužných tkanin na formát o velikosti papíru A5. Tento formát je ideální pro použití vulkanizačního lisu, který se nachází v laboratořích mechanických zkoušek na Fakultě technologické v budově U15.



Obrázek 35-Stříhání vláken na rozměr A5.

3.3.2 Výroba formy

Horní a spodní část formy je vystřížena z nerezového plechu na rozměr 250x250x2,5 mm. Výroba mezikusu nebyla nutná, různé rozměry tloušťek jsou k dispozici u lisu v laboratořích.



Obrázek 36-Horní a spodní díl lisovací formy.

Aby bylo docíleno co nejlepší kvality povrchu, byl vybrán leštěný povrch forem.

3.4 Volba zpracovatelských podmínek pro zvolenou výrobní technologii.

Pro zvolenou technologii lisování byl použit laboratorní vulkanizační lis s regulací teploty horní a spodní plotny o maximální teplotě zahřátí 200°C s digitálním řízením teploty po jedné desetině.



Obrázek 37-Laboratorní vulkanizační lis.

Volbu optimální teploty nastavení vulkanizačního lisu najdeme v materiálových listech od výrobců polymerů viz. příloha 1. Naše teplota tavení se pohybuje v rozmezí 180-190°C.

Tlak potřebný pro lisování je zabezpečen v horní a spodní části lisu. Po ručním dotažení je možno použít spodního hydraulického zvedáku o svírací síle 5t. Optimální lisovací sílu a vliv na výsledný kompozit budu zjišťovat v průběhu výroby prototypů.

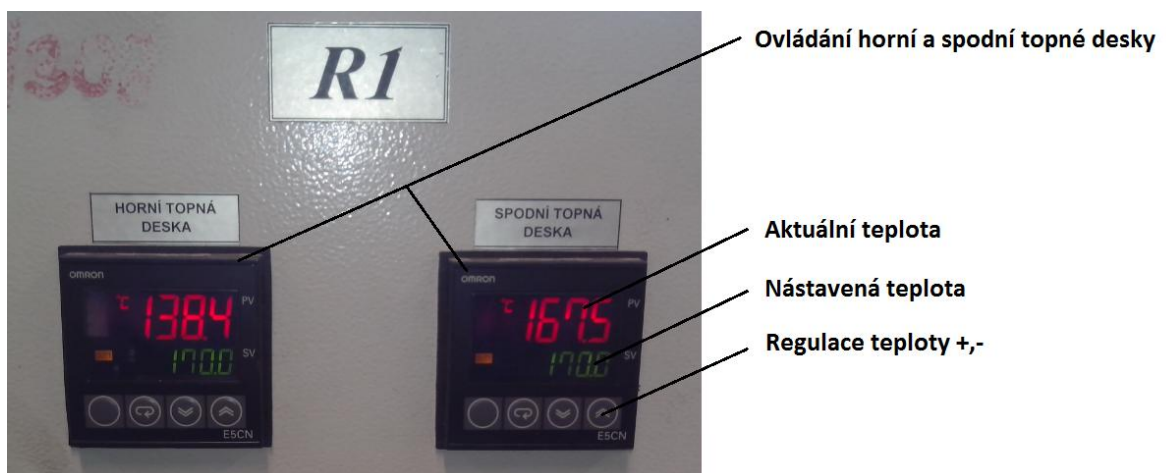
3.5 Výrobní postup

Výrobní postup je rozdělen do pěti fází:

- 1) fází se zahřívá lisovací forma na teplotu tavení vybraného polymeru,
- 2) fází je do vyhřáté formy vložen polymer ve formě granulí spolu s výztužnými vlákny v daném pořadí,
- 3) fází se uzavře forma horní části a vloží se opětovně do lisu, kde se lisuje po určitou dobu, která je určena v průběhu výroby pro každý materiál zvlášť,
- 4) fází se vytáhne forma z lisu a nechá se ochladit na vzduchu zatížená ocelovou deskou, aby se zamezilo případným deformacím, které mohou vznikat při ochlazení,
- 5) fází se zvedne horní část formy a vyjme se vyrobená kompozitní deska.

První fáze

Při spuštění lisu je třeba vyčkat po určitou dobu než se lis, forma a pomocné desky nateperují na požadovanou teplotu, kterou jsme nastavili. Je velice důležité prohřát formu, aby polymer setrval ve formě po co nejkratší dobu a nedocházelo k případné degradaci. Zda je forma již nateperována poznáme tak, že horní a spodní topná deska ukazují stejnou teplotu a zároveň i teplotu, kterou jsme nastavili pro daný polymer.



Obrázek 38-Regulace teploty lisu.

Druhá fáze

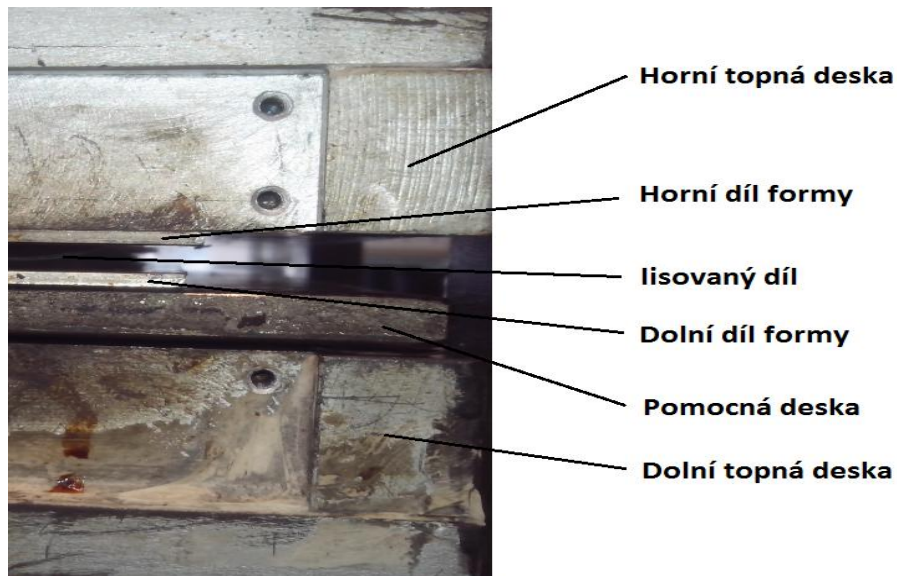
Aby se nám lépe vkládala a vyndávala forma, je pod formou vložena pomocná ocelová deska. Tato deska nejenže usnadní manipulaci s formou, ale i teplo vně uložené nám zabrání rychlému ochlazování natepované formy při jejím plnění. Na spodní část formy se vloží ochranná teflonová folie, která chrání lis před případnými přetoky polymeru přes okraj formy a zároveň nám pomáhá k rychlému odformování. V dalším kroku následuje vložení vláken a granulí polymeru v určeném pořadí. Formu uzavírá opět ochranná teflonová folie a horní část formy. Při lisování s mezikusem se postupuje stejně, jen je na ochrannou folii vložen mezikus.



Obrázek 39-Příprava ve formě.

Třetí fáze

V této fázi dochází k samotnému prosvycování tkaniny. Polymer se taví a horní část lisu pomalu stlačuje natavený polymer až do dosednutí na formu. Případný dotlak lze provést hydraulickým zvedákem. Po uzavření formy se spustí čas setrvání, při kterém se polymer plně roztaví a prosytí vlákna výztuže. Potřebná rychlost lisování se určí přímo v průběhu výroby prototypu.



Obrázek 40-Lisování kompozitního dílce.

Čtvrtá fáze

Po uplynutí stanoveného času se povolí lisovací síla a vyjme se forma i s pomocnou deskou z lisu. V tuto chvíli nastává chlazení na vzduchu. Lisovací forma i s pomocnou deskou se zatíží seshora ocelovou deskou o hmotnosti 3kg. Zanedlouho nastane ztuhnutí matrice s charakteristickým zvukem jako by praskal led, který je způsoben ochlazováním a smršťováním polymeru v kompozitu.

Pátá fáze

Po ochlazení na vyhazovací teplotu lze kompozitní desku bezpečně vyjmout. Sejme se ochlazovací deska a horní díl formy, odtrhne se teflonová folie a vyjme se vylisovaný termoplastický kompozit.

4 VÝROBA PROTOTYPU Z NAVRŽENÉHO KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU

4.1 Testování formy

Jako první byla otestována samotná lisování směs polymeru do formy, abychom zjistili, jaký čas je zapotřebí k úplnému roztopení granulek. Následující vzorky se lisovaly za snížené teploty a s menším množstvím polymeru, aby se zjistilo, jaký vliv mají nedostatky na výslednou vylisovanou desku z polymeru. Následně se tyto parametry upravovaly tak, aby výsledný produkt byl bez defektů.

4.1.1 Výpočet hmotností granulí potřebných pro lisování

Aby nám polymer nepřetékal přes okraj formy, je potřeba znát, jaký objem zaujme ve formě.

rozměry dutiny mezikusu: 120x120x5

- objem dutiny muzikusu: $V = 72000 \text{ mm}^3$
- hmotnost polymeru: $m_p = \rho \cdot V$; kde za ρ -je hustota daného polymeru

4.2 Lisování polymeru do formy

4.2.1 PP TATREN

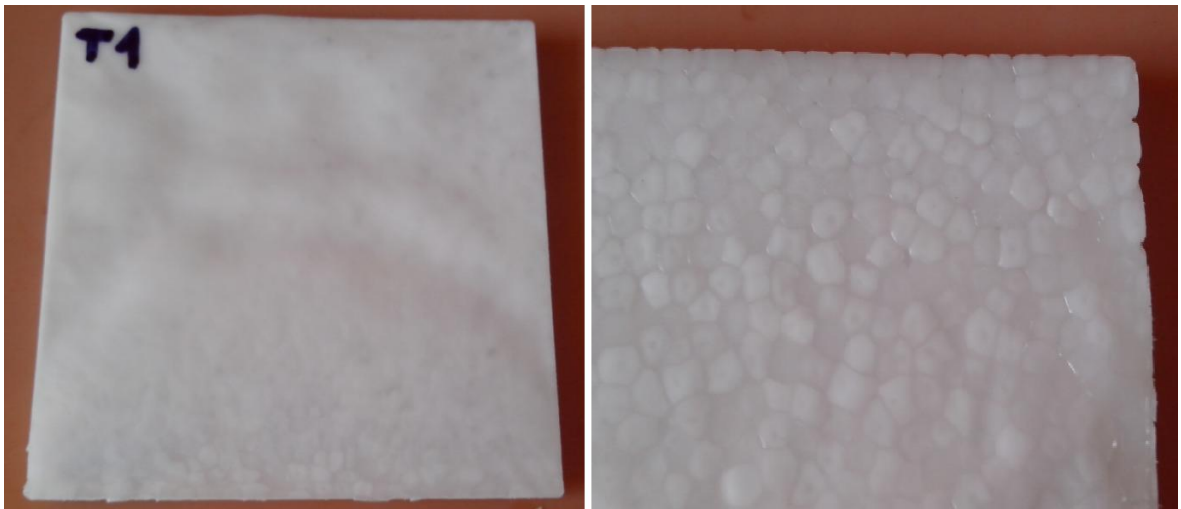
-teplota zpracování dle materiálového listu je v rozmezí: 190-250°C, $\rho = 0,940 \text{ g.cm}^{-3}$

-hmotnost potřebného polymeru: $m_p = 68\text{g}$



Obrázek 41-Vylisovaná destička s PP TATREN.

Při zjišťování potřebného času pro úplné roztavení a spojení jsme vycházeli s časem 480 vteřin a teploty 180°C, o 10°C pod teplotou zpracování určené v materiálových listech. Při tomto času a teplotě se polypropylen neúplně rozpustil a je vidět ve světle jak granule byly pouze natavené a silou lisu se k sobě více méně slepily jak je vidět na vzorku T1. Při teplotě 195°C a času 600 vteřin se granule roztavily a spojily se v homogenní celek.



Obrázek 42-Vzorek T1, PP TATREN.

4.2.2 HDPE DOW

-teplota zpracování dle materiálového listu je v rozmezí: 190-250°C, $\rho = 0,955 \text{ g.cm}^{-3}$

-hmotnost potřebného polymeru: $m_p = 69\text{g}$



Obrázek 43-Vylisovaná destička z HDPE DOW.

Při zjišťování potřebného času pro úplné roztavení a spojení jsme vycházeli z času 480 vteřin a teploty 180°C 10°C pod teplotou zpracování. Při tomto času se polyethylen rozpustil, ale ve světle byly vidět stopy po zbytcích granulí, proto byla zvýšena pouze teplota na 190°C a čas zůstal 480 vteřin.

4.3 Lisování do formy s mezikusem

4.3.1 Výpočet hmotností granulí potřebných pro lisování s výztuží

Výpočet je obdobný jako pro lisování bez výztuže, jen se od objemu formy odečte objem použitých výztužných tkanin. Objem, který tkaniny zabírají, se zjistí zvážení výztuže, a protože je známá plošná hmotnost a hustota, lze ji jednoduše vypočítat dle vzorce 2.

4.3.2 Výroba prototypu 1

Při samotném lisování nastávaly různé komplikace:

- deformace špatným chlazením
- neúplné roztavení polymeru matrice
- deformace výztužné tkaniny
- špatné prosycení vláken
- zbarvení vláken výztuže

vzorky P - jedna vrstva tkaniny umístěna doprostřed formy

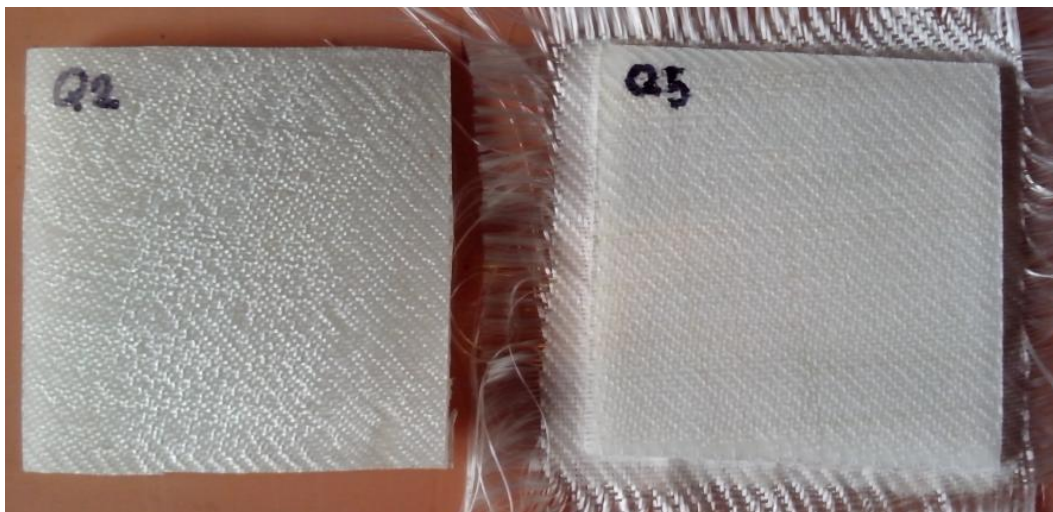
Na prvním vzorku se projevilo několik defektů, které vznikly danou výrobní technologií. Granule polymeru se úplně nerozpustily a skelná tkanina se zdeformovala, jak na ni nerozpuštěné granule tlačily. Další vzorky vykazovaly podobné nedostatky.



Obrázek 44-Vzorky P.

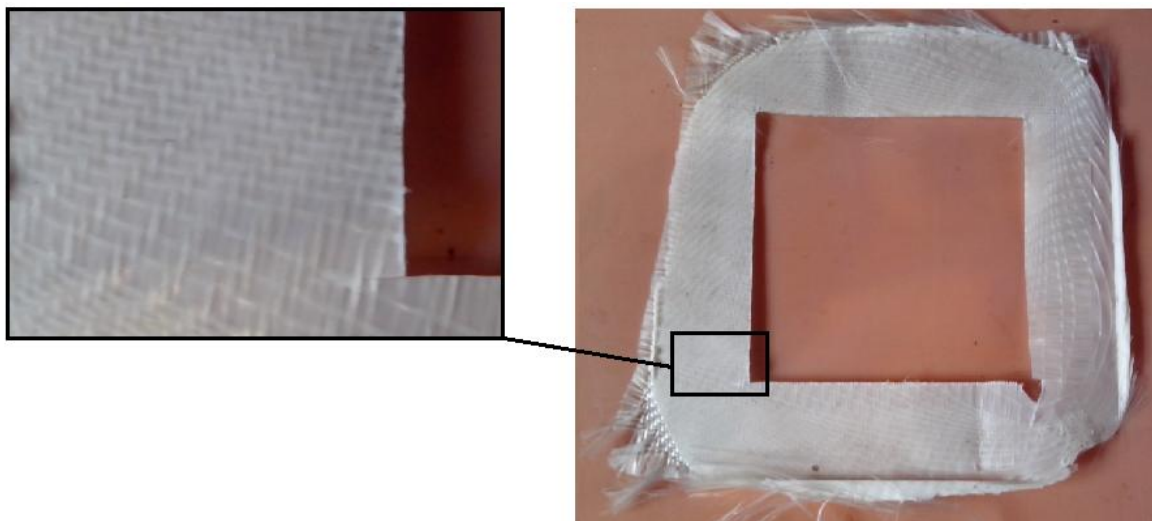
vzorky Q – sendvičová struktura

Vzorek Q2 - HDPE byl nedostatečně ochlazený a vykazoval výrazné zprohýbání, tyto deformace byly odstraněny delším chladícím cyklem. Ostatní vzorky měly na některých místech zežloutlá skelná vlákna, což bylo způsobeno místním přehřátím vláken.



Obrázek 45-Vzorky Q.

Vzorek Q5 - PP byl přeplněn způsobenou chybou při vážení polymeru a tím vznikl přetok na horní straně formy znázorněný na obrázku 46. Vlákna v přetoku byla dostatečně prosycena a vykazovala kompozitní charakter. Další testování se zaměřilo právě na tyto výsledky s cílem dosáhnout laminární struktury.



Obrázek 46-Přetok vzorku Q5.

Podmínky při lisování jsou znázorněny v následující tabulce.

Tabulka 10-Podmínky při lisování vzorků P, Q při teplotě 190°C.

vzorek	materiál matrice	materiál výztuže	struktura plnění formy		lisovací čas [s]	hmotnost polymeru [g]	dotkák	
			v-výztuž	p-polymer			horní	dolní
P1	PP	SKLO		p-v-p	600	66	x	x
P2	PP	SKLO		p-v-p	720	68	x	x
P3	HDPE	SKLO		p-v-p	660	66,8	x	x
P4	HDPE	SKLO		p-v-p	660	67	x	x
Q1	HDPE	SKLO		v-p-v	600	67	x	x
Q2	HDPE	SKLO		v-p-v	660	67	x	x
Q3	PP	SKLO		v-p-v	600	68	x	x
Q4	PP	SKLO		v-p-v	720	68	x	x
Q5	PP	SKLO		v-p-v	720	70	x	

4.4 Lisování do formy bez muzikusu

Z formy byl vyjmut mezikus a lisovalo se mezi horní a spodní díl formy, hmotnost polymeru se určila pokusně pro každý vzorek dle použité tkaniny a výztuže.

4.4.1 Výroba prototypu 2

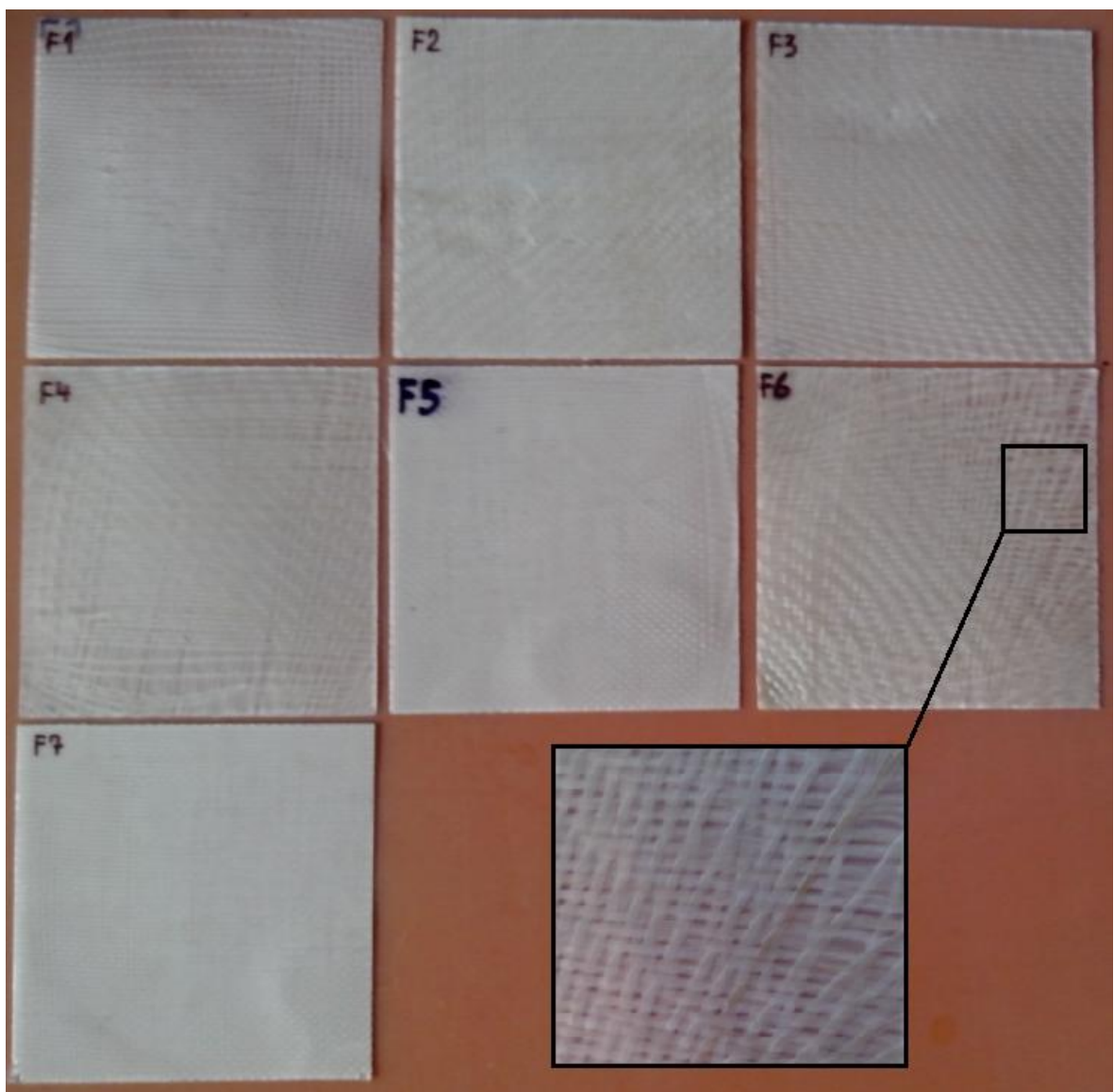
Při samotném lisování nastávaly různé komplikace:

- deformace špatným chlazením
- deformace výztužné tkaniny
- špatné prosycení vláken
- zbarvení vláken výztuže

Anorganická skelná vlákna

vzorky F, H, G, O – laminátová struktura

Vzorky F – materiálem pro sérii vzorků byl polypropylen. Po vyjmutí mezikusu se lisovací čas razantně snížil, granulky polymeru se v krátkém čase při styku s nateperovanou formou začínaly natavovat. Deformace nerovnoměrným ochlazováním byly výrazně potlačeny a čas potřebný na chlazení se zkrátil na polovinu, než která byla potřeba u vzorků s mezikusem. Špatné prosycení se zlepšilo, z těchto důvodů se mohlo přidat i větší počet vrstev k prosycení. Deformace výztužné tkaniny se projevovala na všech vytvořených vzorcích.



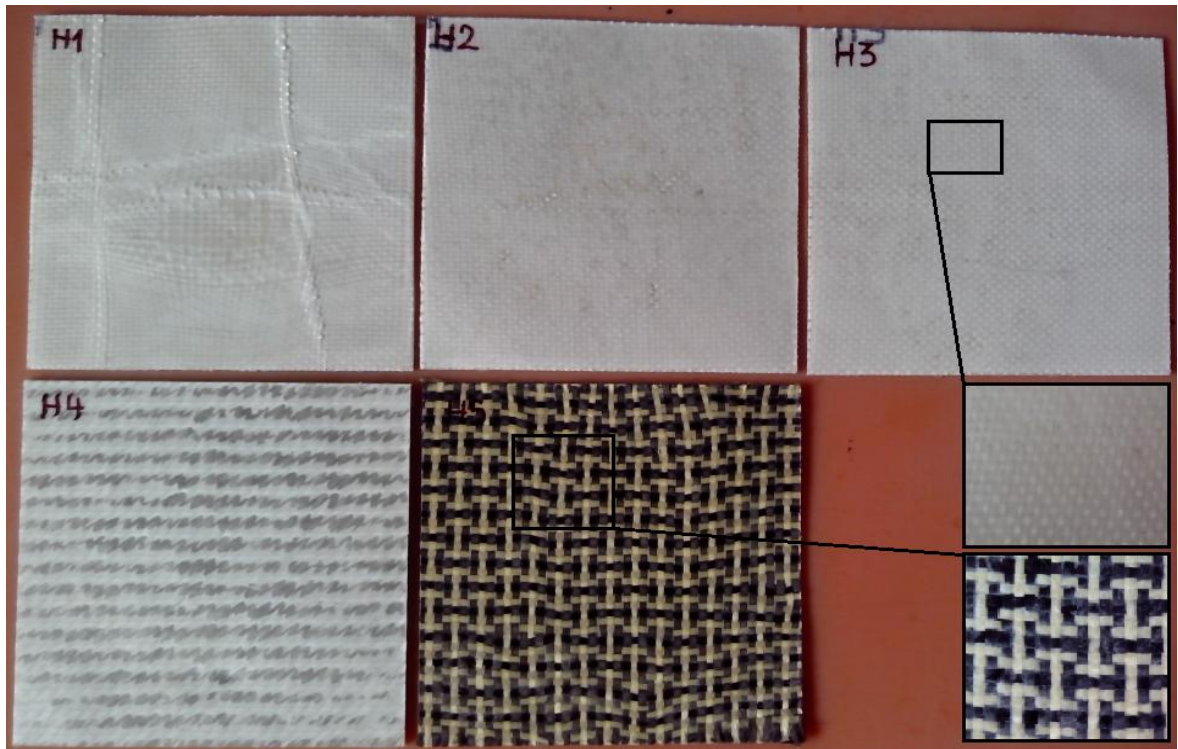
Obrázek 47-Vzorky F.

Vzorky F6 a F7 byly vytvořeny z jednotlivých vrstev a na závěr se obě vrstvy spojily v jeden celek slisováním v čase 60 vteřin. Tím bylo ověřeno, že jednotlivé vrstvy se dají libovolně spojovat do několika vrstev a tak lze vytvořit požadovanou tloušťku kompozitního dílce. U vzorku F6 byl použit spodní a horní dotlak a jednotlivé skupiny vláken se od sebe pod tlakem lisu posunuly. U Vzorku F7 byl použit pouze horní dotlak, aby se zamezilo přílišnému posuvu vláken. Bez použití spodního hydraulického dotlaku byla vlákna o poznání méně zdeformovaná ve srovnání se vzorkem F6, jak je vidět na obrázku 47. V následující tabulce jsou podmínky, při kterých byly vzorky vylisovány.

Tabulka 11-Podmínky při lisování vzorků F při teplotě 190°C.

vzorek	materiál	materiál	vazba	struktura plnění formy		lisovací čas	hmotnost polymeru	dotlak	
	matrice	výztuže	výztuže	v-výztuž	p-polymer	[s]	[g]	horní	dolní
F1	PP	SKLO	plátno	p-v		480	3	x	x
F2			kepr 2x2	v-p-v		480	5	x	x
F3			kepr 2x2	v-p-v		480	4	x	x
F4			kepr 2x2	v-p-v		300	4	x	x
F5			kepr 2x2	v-p-v-p-v-p-v		300	9	x	x
F6			kepr 2x2	v-p , v-p		300	2 x 5	x	x
F7			plátno	v-p , v-p		300	2 x 5	x	

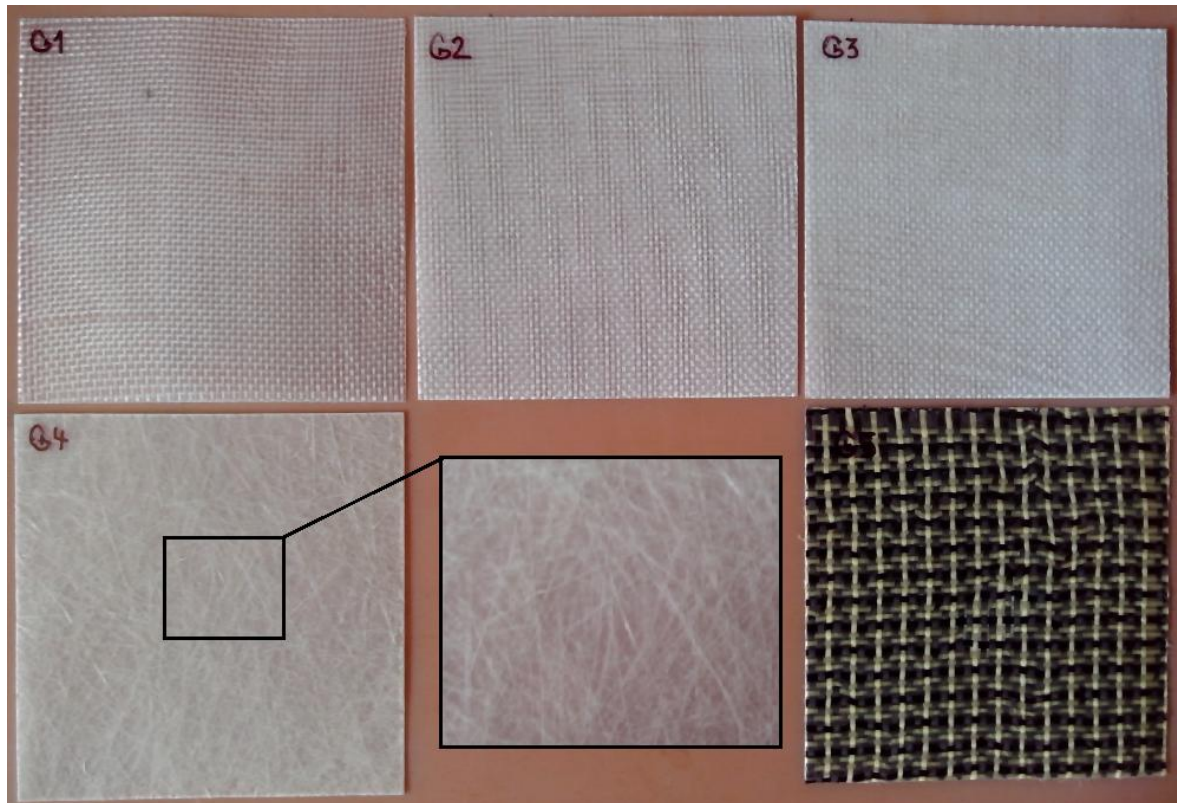
Vzorky H - materiálem pro sérii vzorků byl polypropylen. Vnitřní vrstvy obsahují skelné rohože o plošné hmotnosti $300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ a vnější jsou skelné tkaniny s plátňovou vazbou. U vzorku H1- byl použit spodní dotlak a vlákna výztuže byla odprostřed značně deformována. U ostatních vzorků již dolní dotlak nebyl použit a vlákna se přestala nadále deformovat. U vzorků H byl polymer vložen pouze doprostřed mezi vrstvy výztuže, aby byla zjištěna schopnost polymeru prosycovat vlákna skelné výztuže. U vzorku H5 je na ukázkou použita kevlar-karbonová výztuž, zde je vidět horší prosycení uhlíkových vláken ve srovnání s vlákny skelnými.



Obrázek 48-Vzorky H.

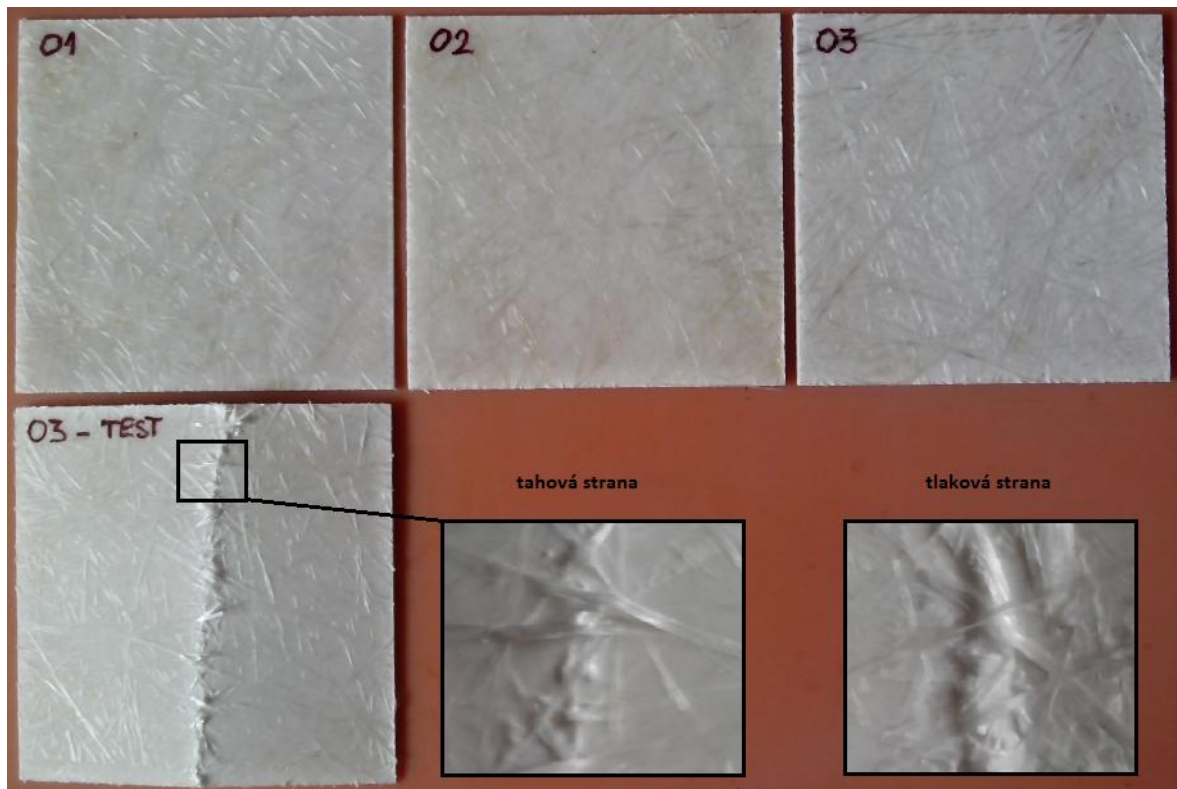
Vzorek H1 byl silou zpřehýbán, byla tak otestována schopnost matrice udržet vlákna. Na ohybu je vidět, jak pevně jsou skelná vlákna uložena v polymerní matrici.

Vzorky G - materiálem pro sérii vzorků byl vysoce hustotní polyethylen. Cílem této série bylo zjištění schopnosti polyethylenu prosycovat vlákna. Tento výsledek je patrný při použití skelné rohože. Rohož zde použitá měla plošnou hmotnost $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. U vzorku G5 je na ukázkou použita kevlar-karbonová výztuž, zde bylo prosycení jedné vrstvy lepší než u vzorku H5 z předchozí série.



Obrázek 49-Vzorky G.

Vzorky O - materiálem pro sérii vzorků byl polypropylen. Tato série byla zaměřena na prosycování rohoží o hmotnosti $450g.m^{-2}$ a vlivu lisovacího času na degradaci vláken. Vzorek O3 byl zlomen pro znázornění soudržnosti matrice a výztuže na stranách, kde působil tah a kde tlak.



Obrázek 50-Vzorky O.

Tabulka 12-Podmínky při lisování vzorků H, G, O při teplotě 190°C.

vzorek	materiál	materiál	vazba	struktura plnění formy	lisovací čas	hmotnost polymeru	dotkak			
	matrice	výztuže	výztuže				v-výz. p-poly. r-rohož	[s]	[g]	horní
H1	PP	SKLO	plátno	v-r-r-p-r-r-v	300	8	x	x		
H2				v-r-p-r-v	300	7	x			
H3				v-v-v-p-v-v-v	300	7	x			
H4				r-p-r	300	7	x	x		
G1	HDPE			SKLO	rohož	v-p	300	5	x	
G2						v-p-v	150	5	x	
G3						v-v-p-v-v	150	7	x	
G4						r-r-r-p-r-r-r	150	7	x	
G5						v-p	150	5	x	
O1	PP					SKLO	rohož	r-p-r	300	18
O2		r-r-p-r-r	300					35	x	
O3		r-r-p-r-r	150					35	x	

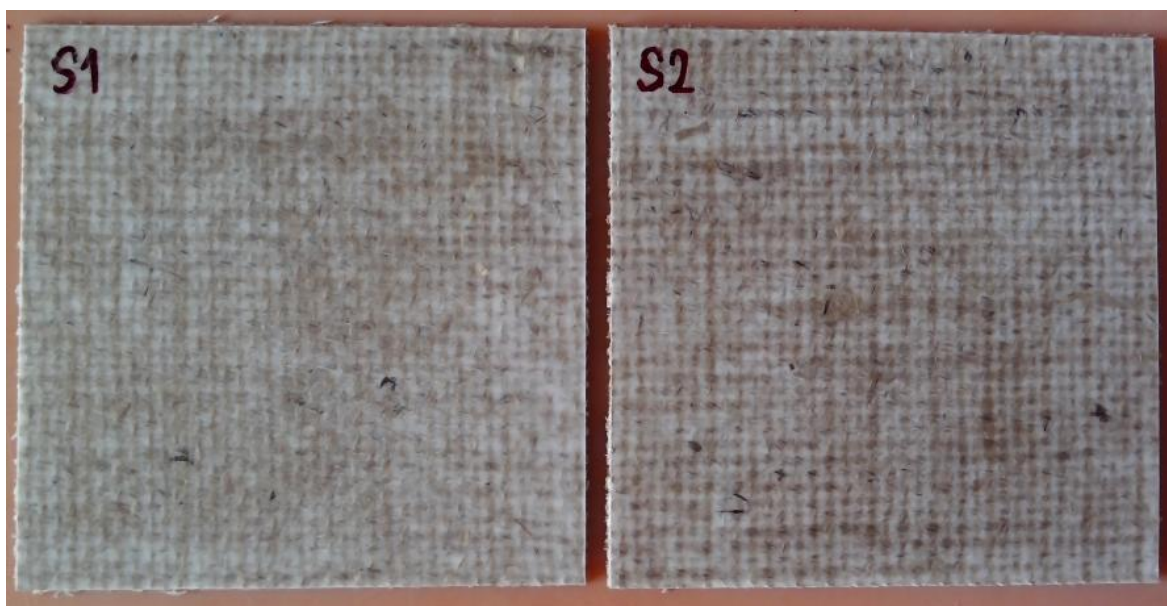
Organické vlákno juta

S doposud dosaženými zkušenostmi z předchozích vzorků byly poznatky aplikovány i při technologii lisování jutové tkaniny. Výhody použití juty jsou v oblasti recyklace výborné:

- 100 % přírodní vlákno
- biologicky rozložitelná
- neprodukuje žádné toxické plyny ani jiné škodlivé chemické látky

Při lisování jutové tkaniny nevznikaly žádné další komplikace.

Vzorky S - materiálem pro sérii vzorků byl polypropylen. Byl vytvořen dvou a čtyřvrstvý kompozitní systém. Vzniklý kompozit vykazoval dobrou tuhost a prosycení vláken bylo překvapivě dobré. Poměr hmotnosti vláken výztuže k hmotnosti polymeru je v poměru 1:1.



Obrázek 51-Vzorky S.

Tabulka 13-Podmínky při lisování vzorků S při teplotě 190°C.

vzorek	materiál	materiál	vazba	struktura plnění formy		lisovací čas [s]	hmotnost polymeru [g]	dotkák	
	matrice	výztuže	výztuže	v-výztuž	p-polymer			horní	dolní
S1	PP	SKLO	plátno	v-p-v		120	20	x	
S2				v-v-p-v-v				150	40

4.4.2 Vyhodnocení lisovací technologie

Lisování bez mezikusu se projevilo jako efektivní řešení pro zhotovení testovacích destiček pro mechanické zkoušky v ohybu a krutu. U skla docházelo k posunu a deformaci vláken, to bylo zapříčiněno velkým lisovacím tlakem a rychlostí. Při změně těchto proměnných se defekty nevyskytovaly. Lisovací tlak byl upraven vyřazením dolního dotlaku. Degradace skelné tkaniny se snížila kratším lisovacím časem, ale i tak po změně lisovacího času bylo prosycení tkaniny dobré a zároveň bylo docíleno nižšího celkového času na výrobu kompozitní součásti. Výhoda použití termoplastické matrice se ukázala u vzorků F6 a F7, které byly zhotoveny z jednotlivých vrstev a ty pak spolu slisovány v jeden kompaktní kus. Svařování jednotlivých kompozitních dílů nebude tedy problémem. U juty se nevyskytovaly žádné nové komplikace. Prosycování vláken polymerem je u kompozitů s jutovými vlákny velice dobré.

Lisovací technologie je rychlá, jednoduchá a snadno regulovatelná. Za použití jiných polymerů by vzniklé kompozity vykazovaly i jiné hodnoty. Ale jelikož se jedná o počáteční fázi studia této problematiky, zaměříme se pouze na jeden druh polymeru, ze kterého se následovně vyrobí zkušební tělíska pro zjištění jejich mechanických vlastností.

4.5 Výroba testovacích tělísek

Z dosavadních výsledků byl vybrán polypropylen jako polymer matrice. Výztuhu tvoří jednotlivé vrstvy tkaniny s plátňovou vazbou ze skla a z juty. Vyrobeny byly v provedení ve dvou, tří a čtyř vrstvách výztužné tkaniny. V dalším kroku se z vytvořené kompozitní desky vyřezalo na tiskařské řezačce ADAST maxima MS 92 dostatečné množství vzorků na odpovídající délku a šířku, které byly označeny viz. tabulka 14 a 15.



Obrázek 52-Odpad po vyřezání vzorků,

vyřezané vzorky.

Zkušební tělíska ze skelnou výztuží

- skelná tkanina plošná hmotnost $200g \cdot m^{-2}$
- délka 150mm, šířka 20mm



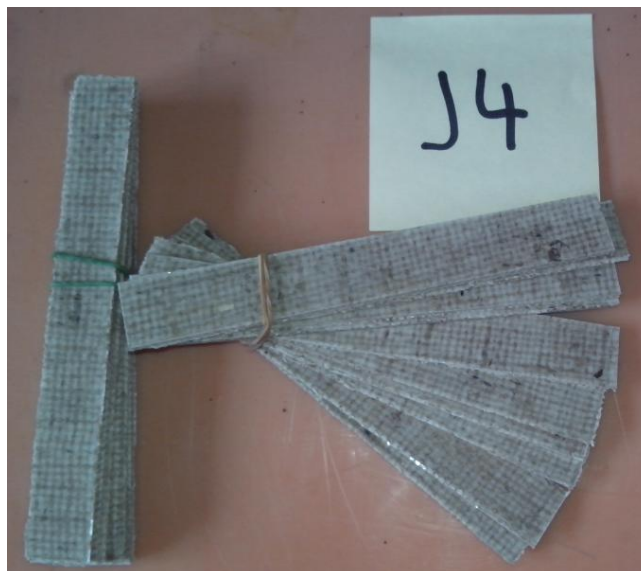
Obrázek 53-Zkušební tělíska S4.

Tabulka 14-Testovací tělíska se skelnou výztuží.

zkušební tělísko poč. vrtev_ číslo vzorku	tloušťka [mm]	hmotnost [g]	zkušební tělísko poč. vrtev_ číslo vzorku	tloušťka [mm]	hmotnost [g]	zkušební tělísko poč. vrtev_ číslo vzorku	tloušťka [mm]	hmotnost [g]
S2_1	0,64	2,48	S3_1	0,75	3,04	S4_1	0,96	4,08
S2_2	0,67	2,59	S3_2	0,74	2,99	S4_2	0,85	3,67
S2_3	0,65	2,44	S3_3	0,70	2,80	S4_3	1,00	3,74
S2_4	0,64	2,50	S3_4	0,72	3,06	S4_4	0,79	3,10
S2_5	0,65	2,50	S3_5	0,75	3,12	S4_5	0,93	4,04
S2_6	0,65	2,43	S3_6	0,75	3,12	S4_6	1,00	3,95
S2_7	0,64	2,45	S3_7	0,77	3,08	S4_7	0,97	4,05
S2_8	0,68	2,56	S3_8	0,72	2,93	S4_8	1,00	4,21
S2_9	0,65	2,46	S3_9	0,72	3,02	S4_9	0,99	4,04
S2_10	0,67	2,60	S3_10	0,72	3,06	S4_10	1,00	4,10

Zkušební tělíska s jutovou výztuží

- jutová tkanina plošná hmotnost $305\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
- délka 150mm , šířka 20mm



Obrázek 54-Zkušební vzorky J4.

Tabulka 15-Testovací tělíska s jutovou výztuží

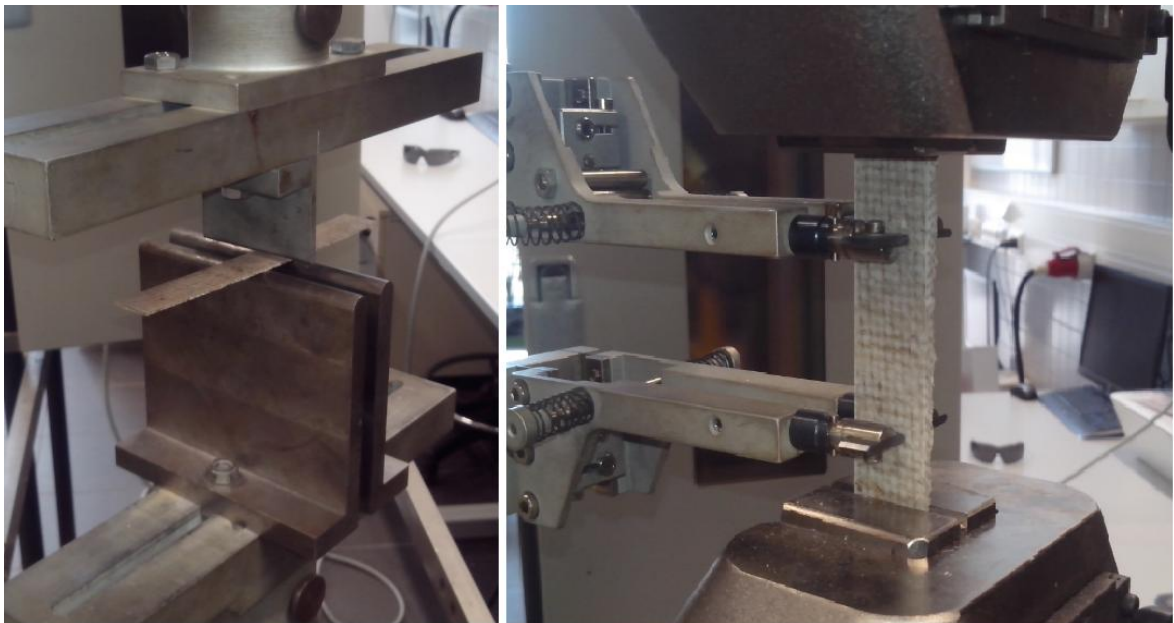
zkušební tělísko	tloušťka	hmotnost	zkušební tělísko	tloušťka	hmotnost	zkušební tělísko	tloušťka	hmotnost
poč. vrtev_ číslo vzorku	[mm]	[g]	poč. vrtev_ číslo vzorku	[mm]	[g]	poč. vrtev_ číslo vzorku	[mm]	[g]
J2_1	1,35	4,07	J3_1	1,81	5,40	J4_1	2,50	7,38
J2_2	1,33	3,93	J3_2	1,82	5,52	J4_2	2,56	7,50
J2_3	1,49	4,21	J3_3	1,85	5,45	J4_3	2,60	7,81
J2_4	1,38	4,06	J3_4	1,84	5,30	J4_4	2,57	7,83
J2_5	1,33	3,88	J3_5	1,85	5,44	J4_5	2,60	7,74
J2_6	1,43	4,14	J3_6	1,84	5,45	J4_6	2,74	7,79
J2_7	1,40	4,10	J3_7	1,89	5,33	J4_7	2,56	7,27
J2_8	1,41	4,13	J3_8	1,95	5,59	J4_8	2,73	7,81
J2_9	1,48	4,29	J3_9	1,81	5,21	J4_9	2,60	7,55
J2_10	1,43	3,96	J3_10	1,82	5,10	J4_10	2,74	7,75

5 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

V této části diplomové práce jsou zkušební tělíska testována při namáhání v tahu a ohybu. Výsledné hodnoty budou srovnány s etalonem, kterým je nevyztužený polypropylen při teplotě lisování 190°C. Vyrobený etalon bude srovnán s technickým listem PP Tatrenu.

Mechanické zkoušky v ohybu a tahu byly provedeny na přístroji Zwick 1456 dle normy ČSN EN ISO 178, ČSN EN ISO 14125. Tento přístroj s dodaným softwarem Test Expert II je vhodný pro:

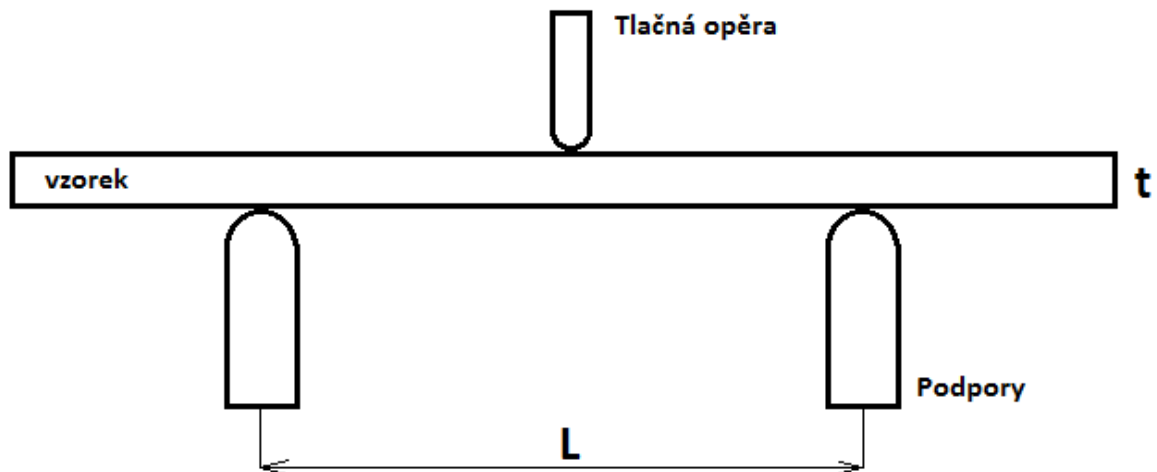
- zkoušky tahem a tlakem plastů, pěnových materiálů, textilu, vlákniny zpevněných kompozitů, laminátů, tkaninových popruhů, papíru, lepenky, dřeva a dentálních materiálů
- zkoušky tahem a tlakem pro kovy
- zkoušky tří a čtyřbodovým ohybem (pro všechny typy materiálů)
- pro určení maximálně dvou elastických modulů
- nastavení a regulace teploty pro teplotní komory



Obrázek 55-Ohyb a tah na přístroji Zwick 1456.

5.1 Zkoušky v ohybu

Nastavení podpor při zkoušce je znázorněno na obrázku 56. Parametry testovaného vzorku ohybovou zkouškou musí dodržovat podmínky udané normou ČSN EN ISO 14125. Ta udává celkovou délku vzorku a vzdálenost podpor vztážené k tloušťce kompozitního laminátu. Rychlost zkoušky byla zvolena na 20mm/min.



Obrázek 56-Vzdálenost nastavení podpor.

Podmínky pro ohybové zkoušky:

- vzdálenost podpor: $L = (16 \pm 1) \cdot t$
- rychlost zkoušky : $v = 20\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- tloušťka a šířka dle tab. 14 a 15
- teplota okolí 20°C

Naměřené hodnoty v ohybu

Každá série obsahuje deset testovacích těles kompozitu, pro která je vyhotovena tabulka, která obsahuje rozměry vzorku (tloušťku a , šířku b), maximální dosažené napětí v ohybu σ_{Mf} , poměrné prodloužení ϵ a modul pružnosti E .

Pro jutovou výztuž

- dvouvrstvý laminát

Tabulka 16-Naměřené hodnoty dvouvrstvého laminátu, Příloha P3.

j2	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	1,325	20	75	5,9	2590
s	0,07906	0	5,22	0,6	223
v	5,97	0	6,95	10,63	8,59

- třívrstvý laminát

Tabulka 17-Naměřené hodnoty třívrstvého laminátu, Příloha P3.

j3	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	1,8	20	76	5	2340
s	0,0527	0	7,67	0,4	479
v	2,93	0	10,09	7,19	20,46

- čtyřvrstvý laminát

Tabulka 18-Naměřené hodnoty čtyřvrstvého laminátu, Příloha P3.

j4	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	2,5	20	80,2	5	1550
s	0	0	5,64	0,5	229
v	0	0	7,03	9,37	14,74

Pro skelnou výztuž

- dvouvrstvý laminát

Tabulka 19-Naměřené hodnoty dvouvrstvého laminátu, Příloha P3.

s2	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,62	20	77,9	4,1	3660
s	0	0	16,6	0,1	587
v	0	0	21,33	2,32	16,06

- třívrstvý laminát

Tabulka 20-Naměřené hodnoty třívrstvého laminátu, Příloha P3.

s3	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,72	20	80,4	3,4	8020
s	0	0	12,9	1	1290
v	0	0	16	28,15	16,15

- čtyřvrstvý laminát

Tabulka 21-Naměřené hodnoty čtyřvrstvého laminátu, Příloha P3.

s4	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,95	20	99,4	4,4	5250
s	0	0	16,3	1,7	1330
v	0	0	16,41	38,23	25,26

5.2 Zkoušky v tahu

Pro zjištění přesného modulu pružnosti v tahu jsme u této zkoušky používali extenzometr. Podstata měření extenzometrem je v tom, že zaznamenává prodloužení v závislosti na napětí na vzdálenosti 40mm, nikoli po celé délce zkušební tělesa. Rychlost $v_E = 1\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Zkoušku v tahu jsme provedli i u etalonu, pro ověření vlastností s dodaným materiálovým listem.

Dle ČSN EN ISO 527 jsme stanovili podmínky pro provádění tahové zkoušky.

Podmínky pro tahové zkoušky:

- rychlost zkoušky $v = 20\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- tloušťka a šířka dle tab. 14 a 15.
- délka vzorků zvolena 150mm
- teplota okolí 20°C

Naměřené hodnoty v tahu

Pro jutovou výztuž

- dvouvrstvý laminát

Tabulka 22-Naměřené hodnoty dvouvrstvého laminátu, Příloha P2.

j2	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	1,405	20	37,3	2,1	3140
s	0,05421	0	2,7	0,2	388
v	3,86	0	7,23	10,23	12,37

- třívrstvý laminát

Tabulka 23-Naměřené hodnoty třívrstvého laminátu, Příloha P2.

j3	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	1,848	20	44	1,9	4260
s	0,04315	0	1,21	0,1	157
v	2,34	0	2,75	7,29	3,68

- čtyřvrstvý laminát

Tabulka 24-Naměřené hodnoty čtyřvrstvého laminátu, Příloha P2.

j4	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	2,62	20	46,2	2	4470
s	0,08576	0	1,86	0,1	432
v	3,27	0	4,02	5,83	9,64

Pro skelnou výztuž

- dvouvrstvý laminát

Tabulka 25-Naměřené hodnoty dvouvrstvého laminátu, Příloha P2.

s2	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,654	20	164	2,5	4980
s	0,0143	0	15	0,2	1240
v	2,19	0	9,15	6,12	24,87

- třívrstvý laminát

Tabulka 26-Naměřené hodnoty třívrstvého laminátu, Příloha P2.

s3	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,734	20	205	2,2	9740
s	0,02119	0	14,8	0,1	789
v	2,89	0	7,23	4,43	8,1

- čtyřvrstvý laminát

Tabulka 27-Naměřené hodnoty čtyřvrstvého laminátu, Příloha P2.

s4	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,949	20	194	2,2	9280
s	0,0731	0	16,3	0,1	1280
v	7,7	0	8,43	4,23	13,84

Pro etalon

Tabulka 28-Naměřené hodnoty pro etalon, Příloha P2.

PP TATREN IM 2263	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,65	20	17,9	2,7	1380
s	0	0	0,537	0,6	31,9
v	0	0	3	24,08	2,31

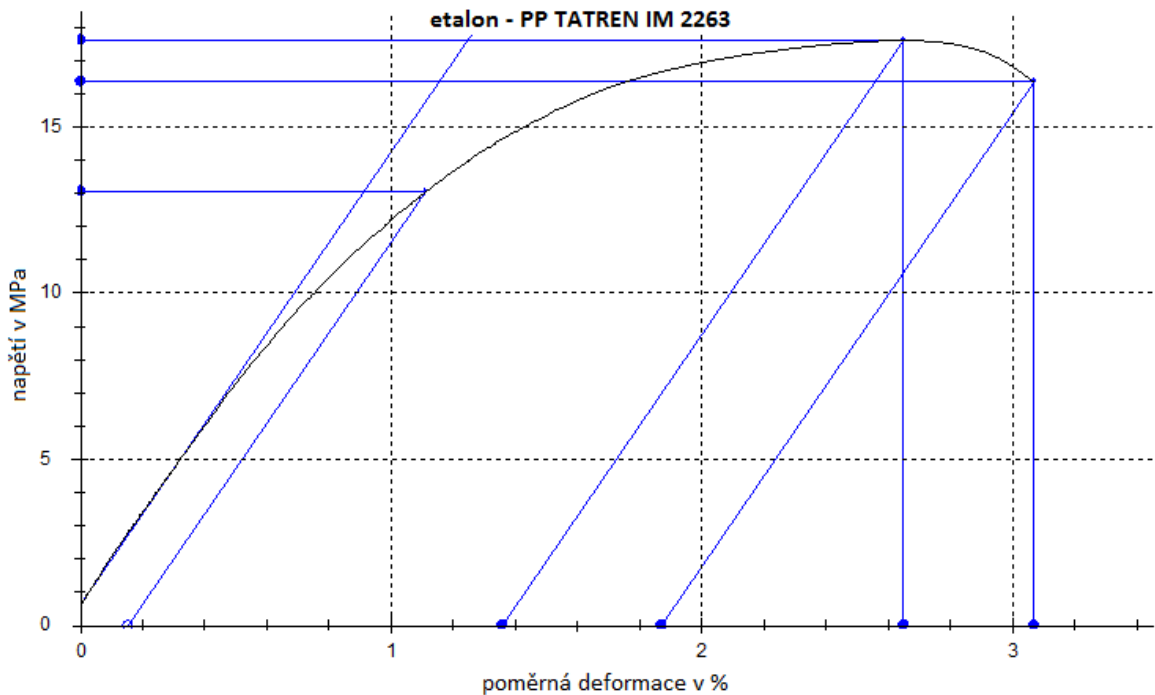
5.3 Rozbor výsledků

Porovnání výsledků modulů pružnosti v tahu dosažených metodou lisování pro samotný PP TATREN IM 2263 s technickým listem, ve kterém jsou mechanické hodnoty vlastností několika měření provedených na standardních zkušebních vzorcích metodou vstřikování připravených dle normy ISO 1873-2 je uvedeno v tabulce 29.

Z výsledků tahové zkoušky vylišovaného zkušební tělesa nám vzešly tyto výsledky:

Tabulka 29-Srovnání etalonu s technickým listem.

PP TATREN IM 2263	σ_M	ϵ	E
tahová zkouška	[MPa]	[%]	[MPa]
etalon	17,9	2,7	1380
technický list	24	5,5	1350



Obrázek 57-Tahový diagram PP TATREN 2263.

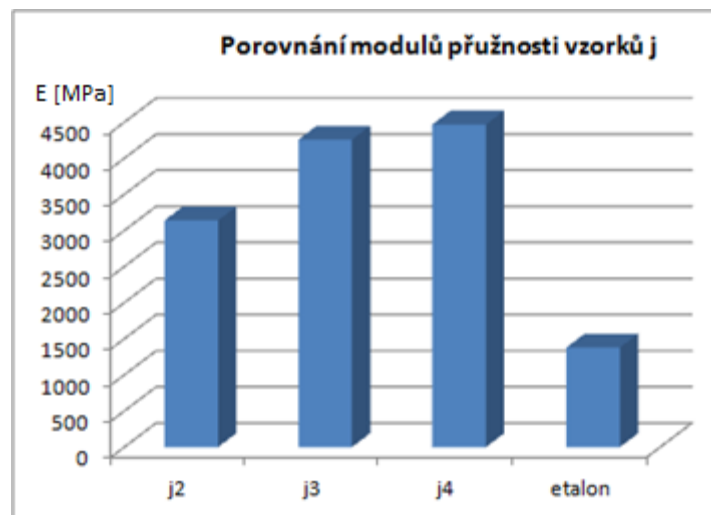
5.3.1 Vyhodnocení tahové zkoušky

Jutový kompozit

Tabulka 30-Hodnoty z tahové zkoušky vzorků j.

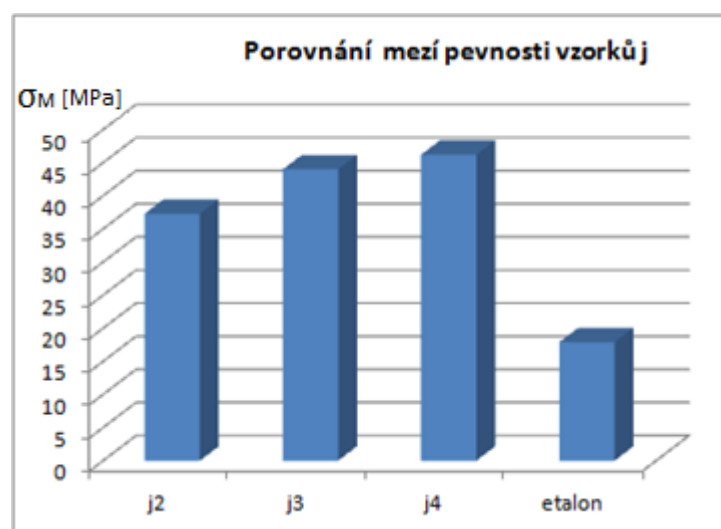
VZOREK tahová zkouška	σ_M [MPa]	ϵ [%]	E [MPa]
j2	37,3	2,1	3140
j3	44	1,9	4260
j4	46,2	2	4470
etalon	17,9	2,7	1380

- porovnání modulů pružnosti jednotlivých vrstev a etalonu



Obrázek 58-porovnání modulů pružnosti vzorků j, Tabulka 29.

- porovnání mezí pevnosti jednotlivých vrstev a etalonu



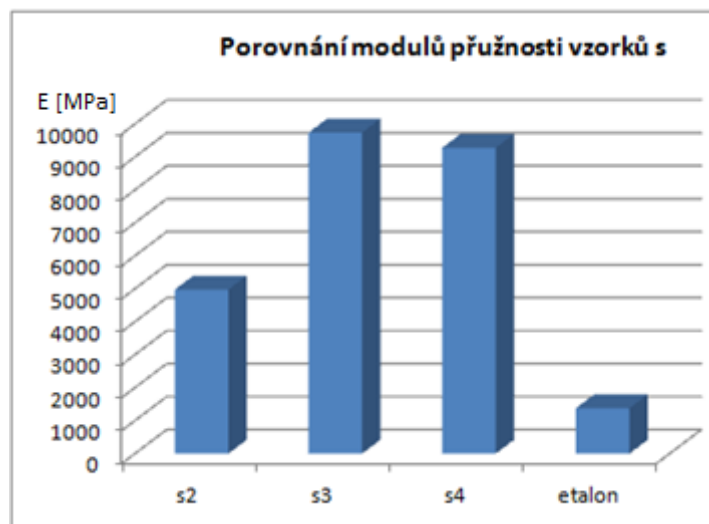
Obrázek 59-Porovnání mezí pevnosti vzorků j, Tabulka 29.

Skelný kompozit

Tabulka 31-Hodnoty z tahové zkoušky vzorků s.

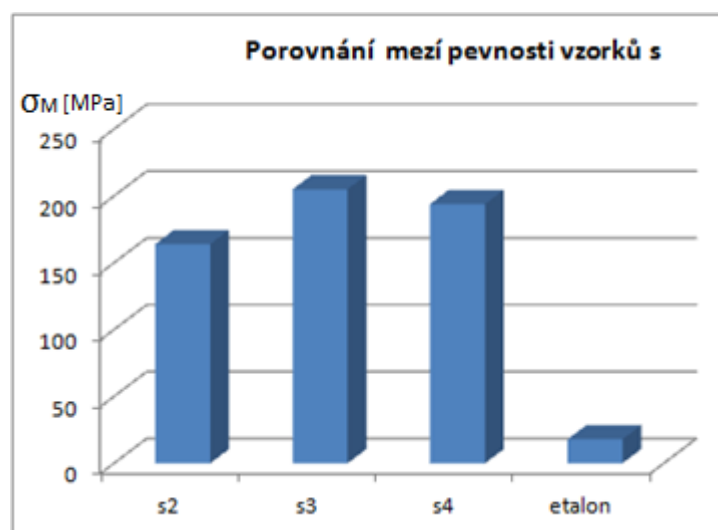
VZOREK tahová zkouška	σ_M [MPa]	ϵ [%]	E [MPa]
s2	164	2,5	4980
s3	205	2,2	9740
s4	194	2,2	9280
etalon	17,9	2,7	1380

- porovnání modulů pružnosti jednotlivých vrstev a etalonu



Obrázek 60-Porovnání modulů pružnosti vzorků j, Tabulka 30.

- porovnání mezi pevnosti jednotlivých vrstev a etalonu



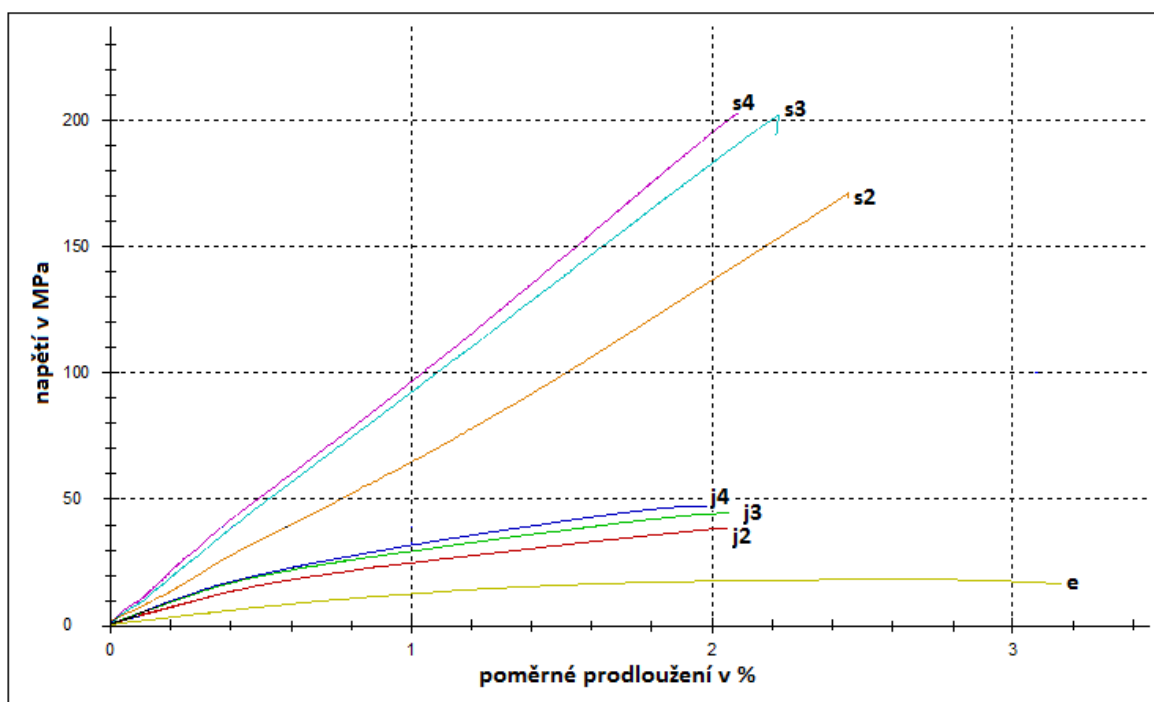
Obrázek 61-Porovnání mezi pevnosti vzorků j, Tabulka 30.

5.3.2 Shrnutí výsledků tahové zkoušky

Na obrázku 57 vidíme etalon, který zastupuje samotnou matici v kompozitní struktuře. Výsledky, kterých jsme dosáhli metodou lisování, se příliš nelišily od hodnot v technickém listu pro metodu vstřikování. Z tabulky 32 je vidět jak jutová výztuž zapůsobila u vzorků j2 a zvýšila modul pružnosti v tahu oproti nevyztuženému polypropylenu více jak dvakrát. U vzorků j3 a j4 je toto navýšení více jak trojnásobné v porovnání se samotnou maticí. Z výsledků bychom mohli usuzovat, že navýšení modulů pružnosti v tahu dosahuje trojnásobku při použití jutové výztuže a matrice z daného polypropylenu. U skelného kompositu se tyto hodnoty mezi vzorky s2 a s3 v výrazně lišily, mohli bychom říci, že třívrstvá tkanina dosahovala nejlepších výsledků.

Tabulka 32-Navýšení modulů pružnosti a mezí pevnosti v porovnání s etalonem.

VZOREK tahová zkouška	σ_M [MPa]	navýšení [%]	E [MPa]	navýšení [%]
etalon	17,9	100	1380	100
j2	37,3	208	3140	228
j3	44	246	4260	309
j4	46,2	258	4470	324
s2	164	916	4980	361
s3	205	1145	9740	706
s4	194	1084	9280	672



Obrázek 62-Tahový diagram, náhodný výběr ze série vzorků j a s.

5.3.3 Vyhodnocení ohybové zkoušky

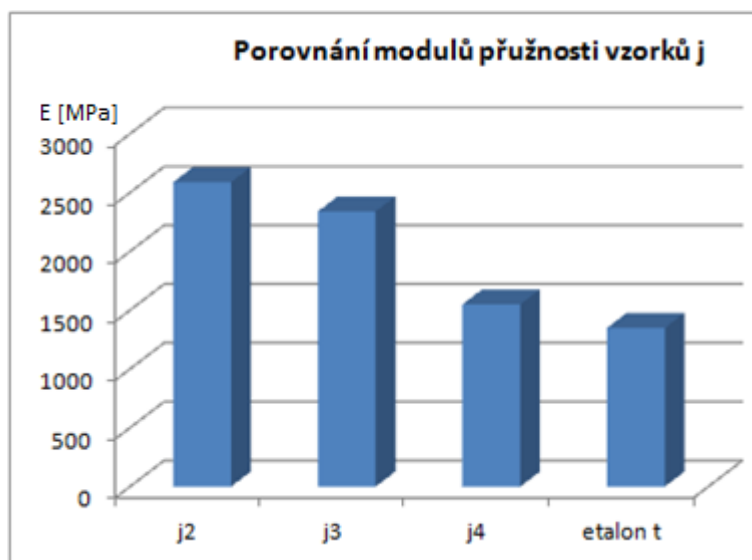
Výsledky ohybové zkoušky jsou porovnány s výsledky uvedenými v technickém listě PP TATRENU 2263 označeného jako etalon t. Vylisovaný etalon nebyl vhodný z důvodu jeho malé tloušťky na ohybovou zkoušku.

Jutový kompozit

Tabulka 33-hodnoty z ohybové zkoušky vzorků j.

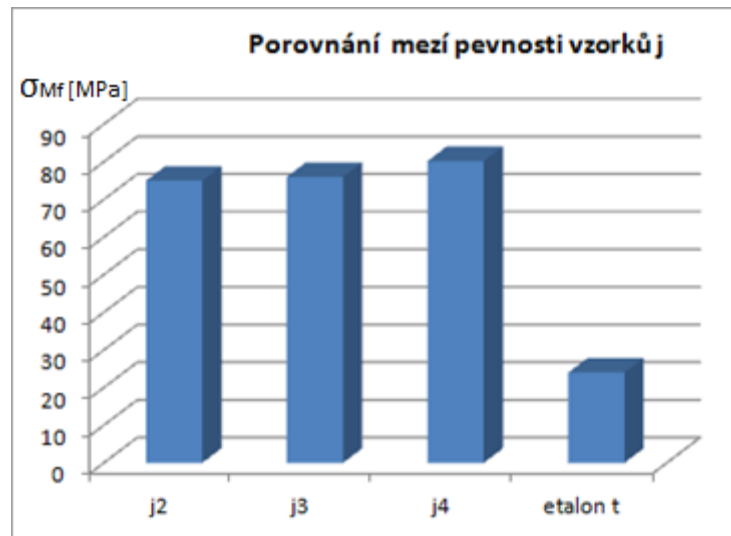
VZOREK	σ_{Mf}	ϵ	E
ohybová zkouška	[MPa]	[%]	[MPa]
j2	75	5,9	2590
j3	76	5	2340
j4	80,2	5	1550
etalon t	24	5,5	1350

- porovnání modulů pružnosti jednotlivých vrstev a etalonu t



Obrázek 63-Porovnání modulů pružnosti vzorků j, Tabulka 33.

- porovnání mezi pevností jednotlivých vrstev a etalonu t



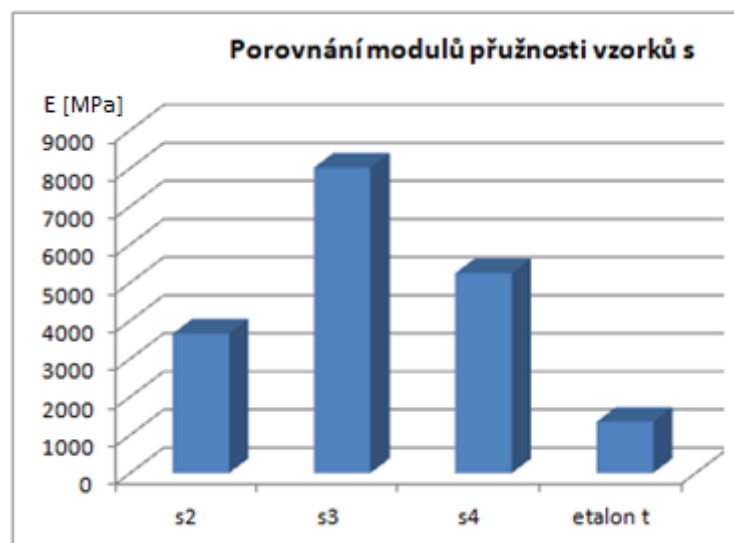
Obrázek 64-Porovnání mezi pevností vzorků j, Tabulka 33.

Skelný kompozit

Tabulka 34-hodnoty z ohybové zkoušky vzorků s.

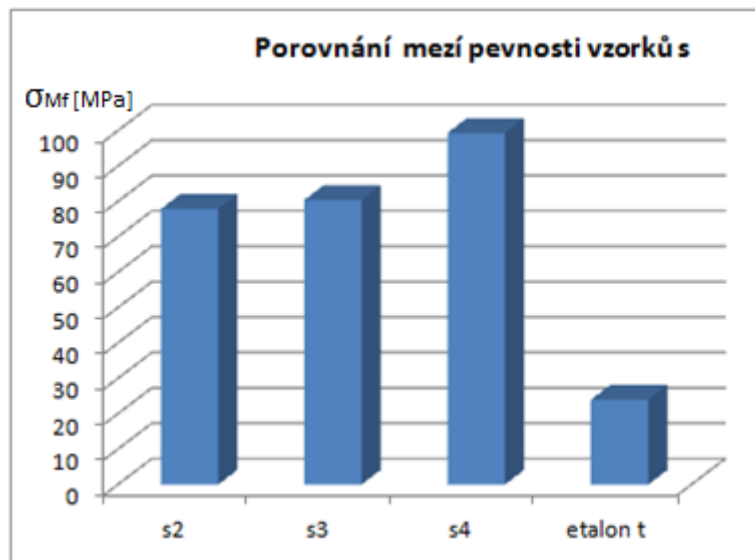
VZOREK	σ _{Mf}	ε	E
ohybová zkouška	[MPa]	[%]	[MPa]
s2	77,9	4,1	3660
s3	80,4	3,4	8020
s4	99,4	4,4	5250
etalon t	24	5,5	1350

- porovnání modulů pružnosti jednotlivých vrstev a etalonu t



Obrázek 65-Porovnání modulů pružnosti vzorků s, Tabulka 34.

- porovnání mezí pevnosti jednotlivých vrstev a etalonu t



Obrázek 66-Porovnání mezí pevnosti vzorků s, Tabulka 34.

5.3.4 Shrnutí výsledků ohybové zkoušky

Navýšení pevnosti oproti etalonu t se pohybovala téměř shodně u jutového kompozitu a u skelného termoplastického kompozitu bylo navýšení trojnásobné. Youngův modul pružnosti v ohybu pro čtyřvrstvý laminát z juty měl navýšení oproti etalonu pouze o 15%. Naopak u třívrstvého skelného laminátu bylo navýšení modulu v ohybu až šestinásobné. U ohybové zkoušky skelných tělísek, docházelo k velkému rozptylu naměřených hodnot u jednotlivých vzorků, jak je možné vidět v příloze 3.

Tabulka 35-Navýšení modulů pružnosti a mezí pevnosti v porovnání s etalonem.

VZOREK	σ _{Mf}	navýšení	E	navýšení
ohybová zkouška	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
etalon t	24	100	1350	100
j2	75	313	2590	192
j3	76	317	2340	173
j4	80,2	334	1550	115
s2	77,9	325	3660	271
s3	80,4	335	8020	594
s4	99,4	414	5250	389

6 MOŽNOSTI VYUŽITÍ

Možnosti využití dané technologie pro výrobu kompozitů spočívají v tom, že můžeme z levných a dostupných zdrojů zhotovit kompozit, který je levný, snadno recyklovatelný a lze ho vyrobit na dostupných výrobních strojích, s možností využití různých druhů přírodních vláken, které jsou v dané lokalitě nejdostupnější. Můžeme volit spousty komerčně dostupných druhů polymeru matrice a využívat právě ty vlastnosti, které daný kompozit má mít podle podmínek, za nichž bude provozován. Je ovšem otázkou jakou budou mít vlákna k dané matici přilnavost.

Využití jutového kompozitu se zdá jako dobré řešení pro úsporu polymeru matrice a výsledky mechanických zkoušek dávají předpoklad pro jeho využití v praxi. Mezi jeho základní výhody patří:

- dostupná, jednoduchá a rychlá technologie
- jednoduchá recyklace
- různé druhy přírodních vláken na bázi celulózy
- spojování teplotou, lze svařovat
- možnosti využití recyklátu
- design vláken, přírodní začínají být v módě
- cena

Metodou lisování by se daly vyrobit například tyto výrobky:

- okapní rýny
- designové dveře
- jídelní prostírání, pивní podtácky
- květináče
- chrániče kolen
- dětské hračky
- zahradní nábytek

Při větších tloušťkách by se mohlo využít sendvičové struktury, otázka jejich funkčnosti by se mohlo stát dalším možným zkoumáním dané problematiky. Pro sendvičové struktury by se našla celá řada praktických využití nejen v letecké a dopravní technice, ale i v ostatních průmyslových odvětvích. To je ovšem otázkou blízké budoucnosti.

V oblastech kde mají problém s plastovými odpadky (sáčky, plastové obaly, láhve, aj.) lze tyto výrobky roztřídit, vyčistit a přetavit na recyklovaný granulát a znovu použít se sníženými vlastnostmi, které kompozitní struktury opět navýší na požadované hodnoty. V chudých a v přímořských oblastech by se dal částečně řešit problém s využitím plastových odpadků.



Obrázek 67-Způsob recyklace plastového odpadu na kompozitní desku.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zhotovit prototyp kompozitního systému s využitím dostupných technologií s ohledem na co nejvyšší recyklaci. Jelikož se jedná o prvotní studii na dané téma, byla využita nejstarší metoda tváření termoplastů a to je lisování. Po návrhu kompozitního systému a zhotovení formy se vyrobila první série vzorků. Tato metoda se zdála v první fázi jako špatně použitelná, ale při změně návrhu prototypu se metoda osvědčila jak pro skelná, tak i pro jutová vlákna s matricí z polypropylenu i polyethylenu. V další části této práce bylo zhotovení zkušebních těles pro následné mechanické zkoušky. Zde bylo dokázáno, že výztuže zvýšily jak modul pružnosti, tak i pevnost. Jutová vlákna mají výhodu v tom, že jsou z obnovitelných zdrojů a jejich možnosti využití jako výztužné plnivo nám ušetří hodně nákladů při zlepšení mechanických vlastností zhotoveného dílce. Vylisovaná deska se nám na první pohled jevila zajímavá a při správném využití by našla jistě uplatnění na trhu. Termoplastické kompozity jsou bezpochyby budoucností, neboť využití jejich rychlého zpracování zlepší produktivitu práce a jejich recyklace je snadnější a dostupnější než u kompozitních systémů na bázi pryskyřice.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Military Handbook, MIL-HBDK-17 - *composite Materials Handbook*, Vol. 1, Washington, USA, 1997. bez ISBN
- [2] MILTON, G.W., *The theory of Composites*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2002. bez ISBN
- [3] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [4] *Mechanika kompozitů* [online]. Brno: VUT Brno, 2008 [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [5] KMT: *Kompozity* [online]. Liberec: KMT Liberec, 2005 [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/KM.htm
- [6] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] MRÁZ, Petr a Jaroslav TALÁCKO. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03540-9.
- [9] Aramidová vlákna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Aramidov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [10] STOLL, Fr. Aramid-, Kohlenstoff- und Glasfasern, Verstärkungsfasern in Hochleistungsverbundwerkstoffen, Focus – Advanced Materials, Akzo, 1900.
- [11] ČERNOŠEK, J.: *Úvod do problematiky kompozitních materiálů*, VUT v Brně, Fakulta technologická, Zlín, 1992.
- [12] PlasticPortal.eu. *Kompozity s termoplastickou maticí a automobilový průmysl*-*PlasticPortal.eu* [online].: PlasticPortal, 2014 [cit. 2015-12-24]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/kompozity-s-termoplastickou-matici-a-automobilovy-prumysl-2-cast/c/2653>
- [13] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.

- [14] BAČOVSKÝ, Marek. *Použití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu* [online]. VUT Brno, 2012 [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52257
- [15] JONÁŠOVÁ, Andrea. *Současný stav v oblasti druhotného zpracování a využití plastů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=22363;download_prace=1
- [16] *Recycling of fibre-reinforced plastics* [online]. JEC Magazine, 2011 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.jecomposites.com/news/composites-news/recycling-fibre-reinforced-plastics>
- [17] *Recyklace uhlíkových kompozitů a BMW i* [online]. BMW, 2013 [cit. 2016-01-27]. Dostupné z: https://www.press.bmwgroup.com/czech/pressDetail.html?title=bmw-i-karbonov%C3%A1-revoluce-1-3-recyklace-uhl%C3%ADkov%C3%BDch-kompozit%C5%AF-a-bmw-i&outputChannelId=46&id=T0141661CS&left_menu_item=node__5247
- [18] *Recyklovaný uhlík jako nový* [online]. Siemens ČR: Siemens, 2014 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/o_nas/inovace/archiv/pages/uhlik-jako-novy.aspx
- [19] *Kompozitní materiály čekají dobré roky* [online]. Praha: Technický týdeník, 2014 [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-inovace/kompozitni-materialy-cekaji-dobre-roky_28759.html
- [20] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů: Lisování reakto-
plastů a termoplastů*. 1. Svitavy: -, 2015. ISBN 978-80-88058-77-9.
- [21] Zwick PC software, *manuál*, 1998
- [22] *Biopolymery a biokompozity: Přírodní rostlinná vlákna* [online]. KMT Liberec: KMT, [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NeM%20Kro/prirodni%20roslinna%20vlakna.ppt
- [23] Polární diagram. *Office.lasakovi*. [online]. [cit. 2016-23-01]. Dostupné z: <http://office.lasakovi.com/excel/grafy/polarni-grafy-excel/>
- [24] Obrázky. Dostupné z: https://www.google.cz/webhp?gws_rd=ssl

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

UP-R		Nenasycená polyesterová pryskyřice
VE-R		Vinilesterová pryskyřice
PFA-R		Fenakrylatová pryskyřice
EP-R		Epoxidová pryskyřice
MA-R		Metakrylátová pryskyřice
PAN		Polyakrylonitril
PEEK		Polyetheretherketon
PP		Polypropylen
HDPE		High-density polyethylen / vysoce hustotní polyetylen
LTF		Termoplasty vyztužené dlouhými vlákny
RTM		Resin Transfer Moulding
RIM		Resin Injection Moulding
TERM		Termal Expansion Resin Transfer Moulding
GMT		Termoplast vyztužený skelnou rohoží
SMC		Sheet Injection Moulding
CNC		Computer Numerical Control / počítačem řízená podpora
a	[mm]	Tloušťka zkušebního tělesa
b	[mm]	Šířka zkušebního tělesa
l/d	[%]	Poměr délky k průměru vlákna
ρ	[$g \cdot cm^{-3}$]	Hustota
l	[mm]	Délka zkušebního tělesa.
d	[mm]	Význam třetí zkratky.
$\varepsilon, \varepsilon_{m,krit}$	[%]	Poměrná deformace
σ_p, σ_{pt}	[MPa]	Pevnost v Tahu
σ_{Mf}, σ_m	[MPa]	Pevnost v Ohybu

E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
v_e	[$mm \cdot min^{-1}$]	Rychlost při měření modul E
x	[-]	Aritmetický průměr, v tabulkách
s	[-]	Směrodatná odchylka
v	[-]	Variační koeficient
m_p	[g]	Hmotnost polymeru

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-Znázornění synergetického efektu v kompozitním materiálu.....	12
Obrázek 2-Synergický efekt v kompozitní struktuře z hliníkové pěny, vložené do tenkostěnné hliníkové trubky. [13].....	13
Obrázek 3-Jednotlivé typy vláknových kompozitů. [4].....	15
Obrázek 4-Prostorové uspořádání vybraných vláknových kompozitů. [4]	15
Obrázek 5-Částicový kompozitní materiál. [4].....	16
Obrázek 6-Skeletový kompozitní materiál. [4].....	16
Obrázek 7-Klasifikace vláknových kompozitů z geometrického pohledu. [4]	17
Obrázek 8-Závislost meze pevnosti vlákna na jeho délce. [4]	18
Obrázek 9-Výroba textilních skleněných vláken tažením z trysek. [7].....	20
Obrázek 10-Schéma výroby uhlíkových PAN vláken. [7]	21
Obrázek 11-Schéma výroby aramidových vláken. [7]	23
Obrázek 12-Druhy vazeb vyztužujících tkanin. [7].....	24
Obrázek 13-Vliv vlastností různých druhů vláken. [7].....	25
Obrázek 14-Diagram napětí-prodloužení u vyztužených kompozitů s termoplastickou a termosetickou maticí. [7].....	29
Obrázek 15-Výroba lopatky větrné elektrárny Siemens o výkonu 6 MW. [24].....	31
Obrázek 16-Polární diagram laminárního kompozitu. [23].....	34
Obrázek 17-Princip strojního stříkání. [8]	36
Obrázek 18-Princip tažení (pultruze). [8]	37
Obrázek 19-Princip konstrukce jednoduché pokládací hlavice portálového robotu. [8].....	37
Obrázek 20-Princip RTM. [8].....	38
Obrázek 21-Zařízení na výrobu SMC prepregů. [7].....	39
Obrázek 22-Princip horizontálního ovíjení komplexních geometrií. [8].....	40
Obrázek 23-Princip technologie přesného navíjení. [8]	40
Obrázek 24-Typy navíjecích strojů. [8].....	41
Obrázek 25-Princip výroby GMT. [8]	42
Obrázek 26-Výroba dílů z GMT. [7].....	43
Obrázek 27-Pokládání termoplastického prepregu. [24]	44
Obrázek 28-Pultruzní zařízení na výrobu LFT. [7]	44
Obrázek 29-Mechanismus drtičů. [24]	46
Obrázek 30-BMW i3. [17].....	50

Obrázek 31-Druhy vazeb. [24]	56
Obrázek 32-Návrh desky pro výrobu zkušebních těles	57
Obrázek 33-Technologie lisování. [20]	58
Obrázek 34-Návrh lisovací formy.	58
Obrázek 35-Stříhání vláken na rozměr A5.	59
Obrázek 36-Horní a spodní díl lisovací formy.	60
Obrázek 37-Laboratorní vulkanizační lis.	60
Obrázek 38-Regulace teploty lisu.	61
Obrázek 39-Příprava ve formě.	62
Obrázek 40-Lisování kompozitního dílce.	63
Obrázek 41-Vylisovaná destička s PP TATREN.	64
Obrázek 42-Vzorek T1, PP TATREN.	65
Obrázek 43-Vylisovaná destička z HDPE DOW.	65
Obrázek 44-Vzorky P.	67
Obrázek 45-Vzorky Q.	67
Obrázek 46-Přetok vzorku Q5.	68
Obrázek 47-Vzorky F.	69
Obrázek 48-Vzorky H.	71
Obrázek 49-Vzorky G.	72
Obrázek 50-Vzorky O.	73
Obrázek 51-Vzorky S.	74
Obrázek 52-Odpad po vyřezání vzorků, vyřezané vzorky.	75
Obrázek 53-Zkušební tělíska S4.	76
Obrázek 54-Zkušební vzorky J4.	77
Obrázek 55-Ohyb a tah na přístroji Zwick 1456.	78
Obrázek 56-Vzdálenost nastavení podpor.	79
Obrázek 57-Tahový diagram PP TATREN 2263.	84
Obrázek 58-porovnání modulů pružnosti vzorků j, Tabulka 29.	85
Obrázek 59-Porovnání mezi pevnosti vzorků j, Tabulka 29.	85
Obrázek 60-Porovnání modulů pružnosti vzorků j, Tabulka 30.	86
Obrázek 61-Porovnání mezi pevnosti vzorků j, Tabulka 30.	86
Obrázek 62-Tahový diagram, náhodný výběr ze série vzorků j a s.	87
Obrázek 63-Porovnání modulů pružnosti vzorků j, Tabulka 33.	88
Obrázek 64-Porovnání mezi pevnosti vzorků j, Tabulka 33.	89

Obrázek 65-Porovnání modulů pružnosti vzorků s, Tabulka 34.	89
Obrázek 66-Porovnání mezi pevnosti vzorků s, Tabulka 34.	90
Obrázek 67-Způsob recyklace plastového odpadu na kompozitní desku.	92

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1-Vlastnosti vybraných vláken v kompozitu. [11]	19
Tabulka 2-Porovnání mechanických vlastností přírodních a skelných vláken [7]	23
Tabulka 3-Orientační ceny vláken v €. [7]	26
Tabulka 4-Porovnání viskozit termoplastových tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách. [7].....	28
Tabulka 5-Mechanické vlastnosti vybraných termosetů. [11].....	28
Tabulka 6-Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů. [11].....	29
Tabulka 7-Některé rozdíly mezi vyztuženými termoplasty a termosety. [7]	33
Tabulka 8-Srovnání výrobních technologií dle dosaženého objemového podílu vláken. [13].....	35
Tabulka 9-Specifické spalné teploty [15]	47
Tabulka 10-Podmínky při lisování vzorků P, Q při teplotě 190°C.....	68
Tabulka 11-Podmínky při lisování vzorků F při teplotě 190°C.....	70
Tabulka 12-Podmínky při lisování vzorků H, G, O při teplotě 190°C.	73
Tabulka 13-Podmínky při lisování vzorků S při teplotě 190°C.....	74
Tabulka 14-Testovací tělíska se skelnou výztuží.	76
Tabulka 15-Testovací tělíska s jutovou výztuží	77
Tabulka 16-Naměřené hodnoty dvouvrstvého laminátu, Příloha P3.....	80
Tabulka 17-Naměřené hodnoty třívrstvého laminátu, Příloha P3.	80
Tabulka 18-Naměřené hodnoty čtyřvrstvého laminátu, Příloha P3.....	80
Tabulka 19-Naměřené hodnoty dvouvrstvého laminátu, Příloha P3.....	81
Tabulka 20-Naměřené hodnoty třívrstvého laminátu, Příloha P3.	81
Tabulka 21-Naměřené hodnoty čtyřvrstvého laminátu, Příloha P3.....	81
Tabulka 22-Naměřené hodnoty dvouvrstvého laminátu, Příloha P2.....	82
Tabulka 23-Naměřené hodnoty třívrstvého laminátu, Příloha P2.	82
Tabulka 24-Naměřené hodnoty čtyřvrstvého laminátu, Příloha P2.....	82
Tabulka 25-Naměřené hodnoty dvouvrstvého laminátu, Příloha P2.....	83
Tabulka 26-Naměřené hodnoty třívrstvého laminátu, Příloha P2.	83
Tabulka 27-Naměřené hodnoty čtyřvrstvého laminátu, Příloha P2.....	83
Tabulka 28-Naměřené hodnoty pro etalon, Příloha P2.....	83
Tabulka 29-Srovnání etalonu s technickým listem.....	84
Tabulka 30-Hodnoty z tahové zkoušky vzorků j.....	85

Tabulka 31-Hodnoty z tahové zkoušky vzorků s.....	86
Tabulka 32-Navýšení modulů pružnosti a mezí pevnosti v porovnání s etalonem.	87
Tabulka 33-hodnoty z ohybové zkoušky vzorků j.....	88
Tabulka 34-hodnoty z ohybové zkoušky vzorků s.	89
Tabulka 35-Navýšení modulů pružnosti a mezí pevnosti v porovnání s etalonem.	90

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P1: TECHNICKÉ LISTY

Příloha P2: ZKOUŠKA TAHEM - JEDNOTLIVÁ MĚŘENÍ

Příloha P3: ZKOUŠKA OHYBEM - JEDNOTLIVÁ MĚŘENÍ

Příloha P4: TESTXPRT II

PŘÍLOHA P1: TECHNICKÉ LISTY

POLYPROPYLEN TATREN IM 2263

TECHNICAL DATA SHEET POLYPROPYLENE TATREN IM 22 63 IMPACT COPOLYMER FOR INJECTION MOULDING

TIPLEN / TIPOLEN / TIPPLEN / TATREN / BRALEN

The joint product portfolio of TVK and SLOVNAFT provides infinite opportunities

DESCRIPTION

TATREN IM 22 63 is a controlled rheology impact copolymer of good processing stability and medium fluidity. This grade contains nucleating and antistatic agent.

TATREN IM 22 63 is characterised by high stiffness and good impact resistance.

APPLICATIONS

TATREN IM 22 63 is intended especially for injection moulding of products where good impact resistance is required – different technical items, consumer goods, household articles, rigid packages etc. Typical end products are buckets for paints and coatings, storage and transport containers, crates, garden furniture, flower pots, toys etc.

TATREN IM 22 63 is suitable for food contact. The product complies with Food Contact Regulations.

PROPERTIES

	Test method	Unit	Typical value
MFR (230 °C/2.16 kg)	ISO 1133-1	g/10 min	22
Tensile stress at yield *	ISO 527-1,2	MPa	24
Tensile strain at yield *	ISO 527-1,2	%	5.5
Modulus of elasticity in tension *	ISO 527-1,2	MPa	1350
Flexural modulus *	ISO 178	MPa	1350
Izod impact strength (notched, 23 °C) *	ISO 180/A	kJ/m ²	10
Izod impact strength (notched, -20 °C) *	ISO 180/A	kJ/m ²	4.5
HDT (0.45 MPa) *	ISO 75-1,2	°C	82
Rockwell hardness *	ISO 2039/2	R scale	77

Typical properties, not to be used as specification.

* Average mechanical property values of several measurements carried out on standard injection-moulded test specimens prepared in accordance with ISO 1873-2.

PROCESSING

TATREN IM 22 63 can be processed on standard injection moulding machines.

Recommended processing temperatures are 190 - 250 °C.

Skelná výztuž 200g/m², vazba: plátno



GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT PRODUCT SPECIFICATION

		Specification	
Style Number	92112	MIL-Y-1140H	
US Style		MIL-C-9084	
WLB No.		DIN 65066	
British Standard		BS 3398	
Finish/Designation		FK900	
		Unit	Tolerance Specification
Weave pattern	Plain		DIN ISO 9354
Area weight	g / m ² 200,0	± 5%	DIN EN 12127
Yarn	tex		DIN EN 12654
warp yarn	EC9-136		
weft yarn	EC9-136		
Fibre count	1 / cm		DIN EN 1049
warp ends	8,0	± 5%	
weft picks	6,5	± 5%	
Temperature resistance 1)			
Continuous load	°C 260		
Short time resistance	°C 600		
Moisture content	% < 0,2	± 1%	DIN EN 3616
Finish content	% 0,08 - 0,28	± 5%	DIN ISO 1987 DIN EN 60
Thickness (approx. dry)	mm 0,20	± 5%	DIN ISO 4603/E
in laminate (43% Vol.)	mm 0,18	± 5%	

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.

INTERGLAS Technologies AG, Benzstraße 1 | D-89155 Eibach, Telefon +49 (0)7305 / 955-416, Fax +49 (0)7305 / 955-512

TS / 28.06.01

Page 1 of 2



GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT
PRODUCT SPECIFICATION

	Unit	Standard	CS-ITG	Tolerance	Specification
Style Number		92112		/ FK600	
Tensile strength					DIN EN 2747
warp	MPa	360		± 10%	
weft	MPa	360		± 10%	
Young's-Modulus					
warp	GPa	20		± 10%	
weft	GPa	20		± 10%	
Compression strength					DIN 53454
warp	MPa	340		± 10%	DIN 65380
weft	MPa			± 10%	DIN prEN 2580
Compression-Modulus					
warp	GPa			± 10%	
weft	GPa			± 10%	
Interlaminar shear strength					DIN EN 2377
warp	MPa			± 10%	
weft	MPa			± 10%	
Flexural strength					DIN EN 2746
warp	MPa			± 10%	
weft	MPa			± 10%	
Flexural-Modulus					
warp	GPa			± 10%	
weft	GPa			± 10%	
Remarks					
1) Temperature resistance for dry fabrics					

Skelná výztuž 280g/m², vazba: kepr 2x2



HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.
 Svěadlice 67
 763 54 Přáslavice
 tel: +420 585 129 011
 fax: +420 585 129 040
info@havel-composites.cz
www.havel-composites.cz
 IČ: 25907379
 DIČ: CZ25907379

GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT
PRODUCT SPECIFICATION

		Specification		
Style Number	92125	MIL-Y-1140H		
US Style		MIL-C-9084		
WLB No.	8.4551.60	DIN 65066		
British Standard		BS 3396		
Finish/Designation	FK144			
	Unit	Tolerance Specification		
Weave pattern	2 x 2 twill			DIN ISO 9354
Area weight	g / m ²	280,0	± 5%	DIN EN 12127
Yarn	tex			DIN EN 12654
warp yarn	EC9-68x3 t0			
weft yarn	EC9-204			
Fibre count	1 / cm			DIN EN 1049
warp ends	7,0		± 5%	
weft picks	6,5		± 5%	
Temperature resistance 1)				
Continuous load	°C	260		
Short time resistance	°C	600		
Moisture content	%	< 0,2	± 1%	DIN EN 3618
Finish content	%	0,08 - 0,28	± 5%	DIN ISO 1887
				DIN EN 60
Thickness (approx. dry)	mm	0,35	± 5%	DIN ISO 4603/E
in laminate (43% Vol.)	mm	0,25	± 5%	

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.
 INTERGLAS Technologies AG, Benzstraße 14, D-89156 Ertebich, Telefon +49 (0)7305 / 955-416, Fax +49 (0)7305 / 955-512
 TS / 16.10.01

v

GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT
PRODUCT SPECIFICATION

	Unit	Standard	CS-ITG	Tolerance	Specification
Style Number		92125		/ FK144	
Tensile strength					DIN EN 2747
warp	MPa	335	430	± 10%	
weft	MPa	320		± 10%	
Young's-Modulus					
warp	GPa	19		± 10%	
weft	GPa	18		± 10%	
Compression strength					DIN 53454
warp	MPa	355		± 10%	DIN 65380
weft	MPa	340		± 10%	DIN prEN 2580
Compression-Modulus					
warp	GPa			± 10%	
weft	GPa			± 10%	
Interlaminar shear strength					DIN EN 2377
warp	MPa	50		± 10%	
weft	MPa	45		± 10%	
Flexural strength					DIN EN 2746
warp	MPa	495		± 10%	
weft	MPa	460		± 10%	
Flexural-Modulus					
warp	GPa	24		± 10%	
weft	GPa	24		± 10%	
Remarks	1) Temperature resistance for dry fabrics				

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.

INTERGLAS Technologies AG, Berzstraße 14, D-89155 Erbach, Telefon +49 (0)7305 / 955-416, Fax +49 (0)7305 / 955-512

TS / 15.10.01

Page 2 of 2

Skelná výztuž 300g/m², vazba: rohož



HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o. ,Svěsdlice 67, 783 54 Přáslavice

tel: +420 585 129 011 fax: +420 585 129 040

info@havel-composites.cz www.havel-composites.com

IČ: 25907379 DIČ: CZ25907379

TECHNICKÝ LIST

Název materiálu: Skelná rohož prášková 300g/m ²			
Technické parametry		Plošná hodnota	Testovací hodnota
Plošná hmotnost g/m ²		300 ± 5%	286
R20 Obsah (%)		≤ 0.8	0.62
Obsah spalitelných látek		2.0 – 8.0	2.7
Vlhkost (%)		≤ 0.2	0,03
Síla v tahu N(150mm X 200mm)	Podélně	≥ 60	281
	Příčně	≥ 60	199
Druh materiálu		Prášková	
Vhodné použití		Polyesterová pryskyřice	
Vzhled		V normě	
Norma		BG/T17471–1998	

Skelná výztuž 300g/m², vazba: rohož



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

TECHNICKÝ LIST

Název materiálu: Skelná rohož prášková 450g/m ²		
Technické parametry	Plošná hodnota	Testovací hodnota
Plošná hmotnost g/m ²	450 ± 5%	445
RZO Obsah (%)	≤ 0.8	0.62
Obsah spalitelných látek	2.0 – 6.0	3.4
Vlhkost (%)	≤ 0.2	0.02
Síla v tahu N(150mm X 200mm)	Podélně	≥ 60
	Příčně	≥ 60
Druh materiálu	Prášková	
Vhodné použití	Polyesterová pryskyřice	
Vzhled	V normě	
Norma	BG/T17471–1998	

Skelná výztuž 988g/m², vazba: bidiagonální



SAERTEX® GmbH & Co. KG
 Brochterbecker Damm 52
D-48369 Saerbeck
 phone: ++49/2574/902-0
 fax: ++49/2574/902-209
 e-mail: info@saertex.com

DATASHEET

STYLE NO.
S32EX010-00980-01270-283000

DESCRIPTION OF STYLE BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC

CONSTRUCTION	AREAL-WEIGHT [g/m ²]	TOLERANCE [+/--%]	MATERIAL	LINEAR DENSITY tex
-45°	476	5	E-Glass	900
90°	29	5	E-Glass	300
+45°	476	5	E-Glass	900
STITCHING:	6	5	PES 76 dtex	

BINDER: Warp

GAUGES: 5

WIDTH: 1270 mm or in tapes

TOTAL AREAL WEIGHT: 988 g/m²

TOTAL TOLERANCE: 5,0 %

Threads of stabilization in 0° (E-Glass 34tex)

Jutová výztuž 305g/m², vazba: bidiagonální

Juteko
 JUTEKO, spol. s r.o.

Adresa: Jindřišská 29, 110 00 Praha 1
 Telefon: +420 224 398 294
 Fax: +420 224 398 296
 Mobil: +420 777 207 525
 E-mail: juteko@juteko.cz

THE NATURAL FIBRE • JUTE-LA FIBRE
 PASER • JETTELIN
 JUTE-DIE NATUR

305 g / m² - 10bcm



305 g / m² - roličky

Dostava: 47 x 47 / 10 cm

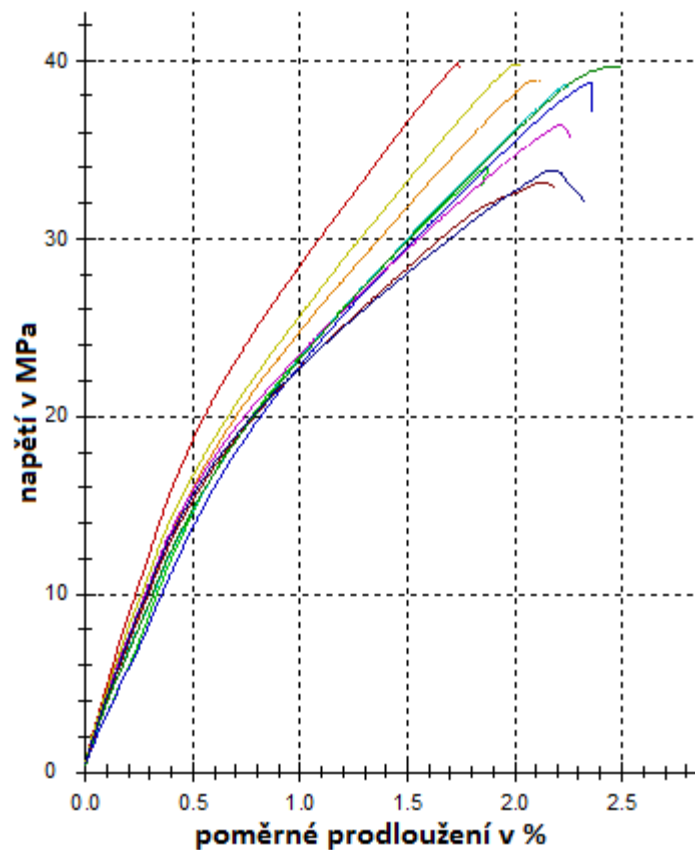
Role: 10bm

Šíře: 90 cm

PŘÍLOHA 2: ZKOUŠKA TAHEM - JEDNOTLIVÁ MĚŘENÍ

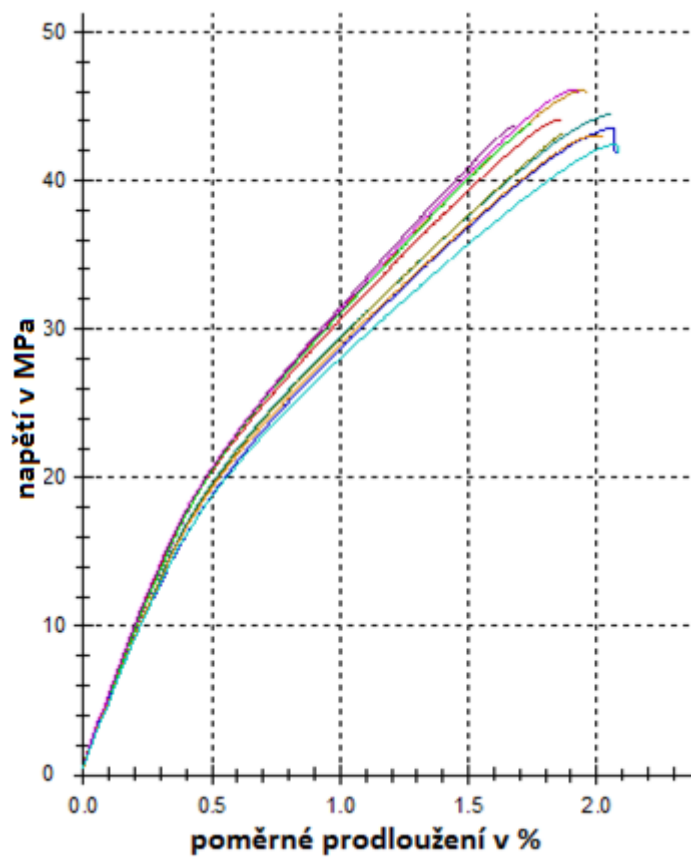
Tabulka 22. Pro jutovou výztuž - dvouvrstvý laminát

j2	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
J2_1	1,35	20	39,9	1,7	3850
J2_2	1,35	20	34	1,9	2680
J2_3	1,49	20	38,8	2,4	2520
J2_4	1,38	20	38,9	2,1	3230
J2_5	1,33	20	36,4	2,2	3280
J2_6	1,43	20	38,6	2,2	2930
J2_7	1,4	20	39,7	2	3480
J2_8	1,41	20	33,2	2,1	3160
J2_9	1,48	20	39,7	2,5	2950
J2_10	1,43	20	33,9	2,2	3320



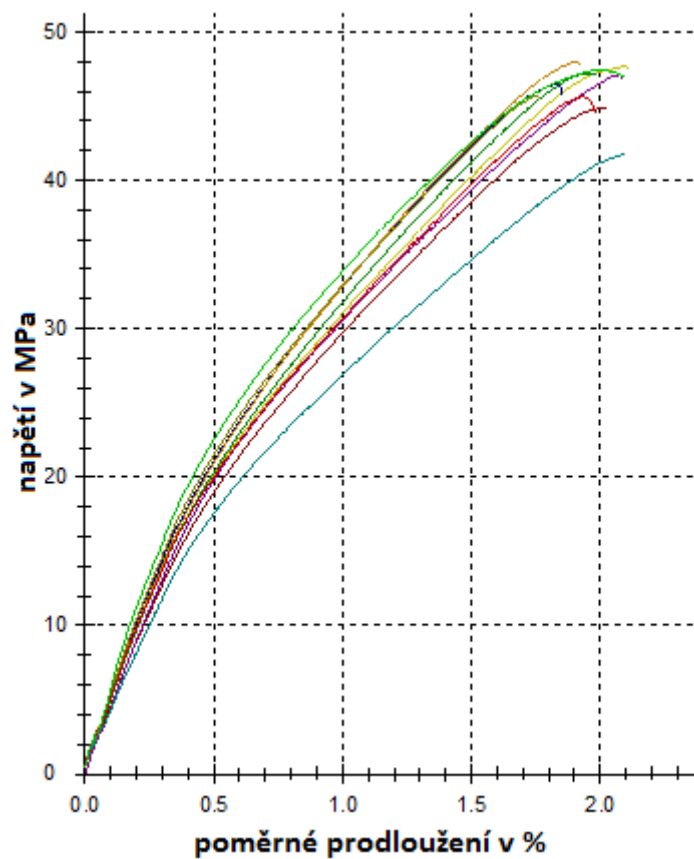
Tabulka 23. Pro jutovou výztuž – třívrstvý laminát

j3	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
J3_1	1,81	20	46	1,9	4380
J3_2	1,82	20	43,7	1,7	4370
J3_3	1,85	20	44,5	2	4150
J3_4	1,84	20	43,2	1,9	4110
J3_5	1,85	20	44	1,8	4380
J3_6	1,84	20	43,8	1,7	4400
J3_7	1,89	20	43,6	2,1	4040
J3_8	1,95	20	43	2	4180
J3_9	1,81	20	46,1	1,9	4490
J3_10	1,82	20	42,4	2,1	4110



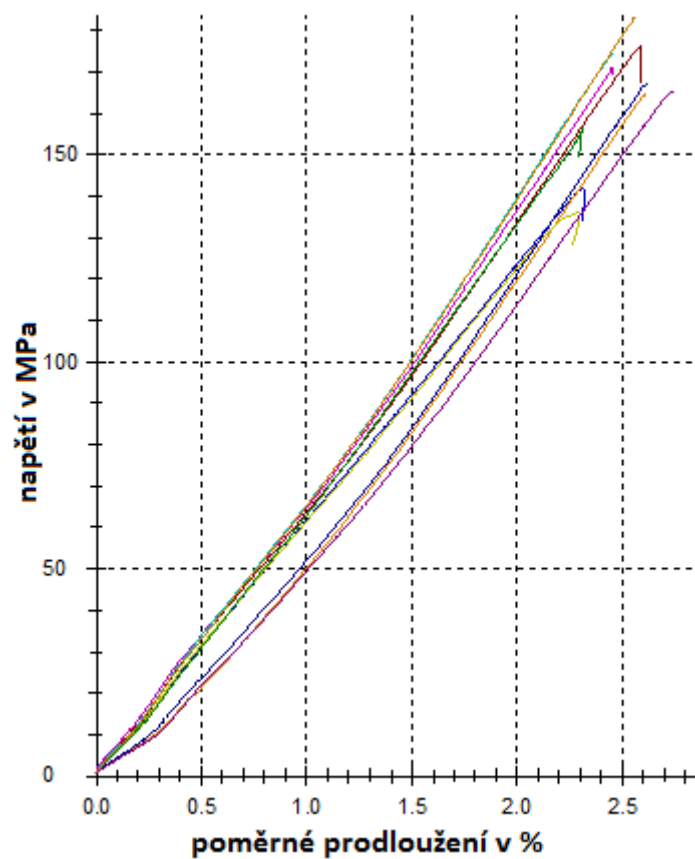
Tabulka 24. Pro jutovou výztuž – čtyřvrstvý laminát

j4	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
J4_1	2,5	20	47,6	2,1	4400
J4_2	2,56	20	44,9	2	3990
J4_3	2,6	20	47,2	2	4470
J4_4	2,57	20	46,5	1,8	4700
J4_5	2,6	20	48	1,9	4530
J4_6	2,74	20	47,1	2,1	4340
J4_7	2,56	20	41,7	2,1	3720
J4_8	2,73	20	45,7	1,7	4870
J4_9	2,6	20	45,6	1,9	4450
J4_10	2,74	20	47,5	2	5270



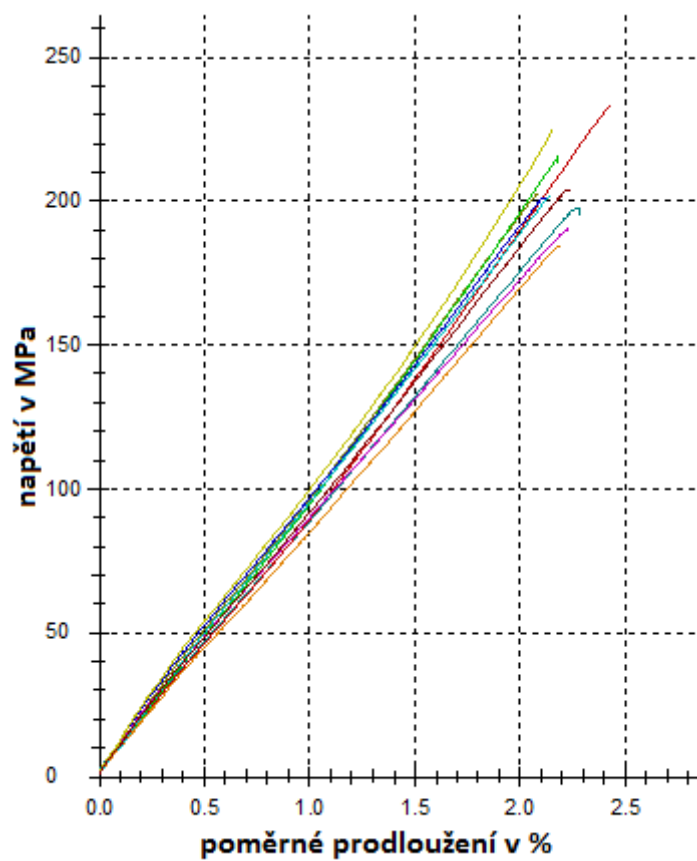
Tabulka 25. Pro skelnou výztuž - dvouvrstvý laminát

s2	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
S2_1	0,64	20	142	2,3	5220
S2_2	0,67	20	165	2,6	3150
S2_3	0,65	20	171	2,5	6240
S2_4	0,64	20	175	2,5	5970
S2_5	0,65	20	136	2,3	5580
S2_6	0,65	20	176	2,6	5890
S2_7	0,64	20	157	2,3	5180
S2_8	0,68	20	167	2,6	3550
S2_9	0,65	20	183	2,6	5960
S2_10	0,67	20	165	2,7	3080



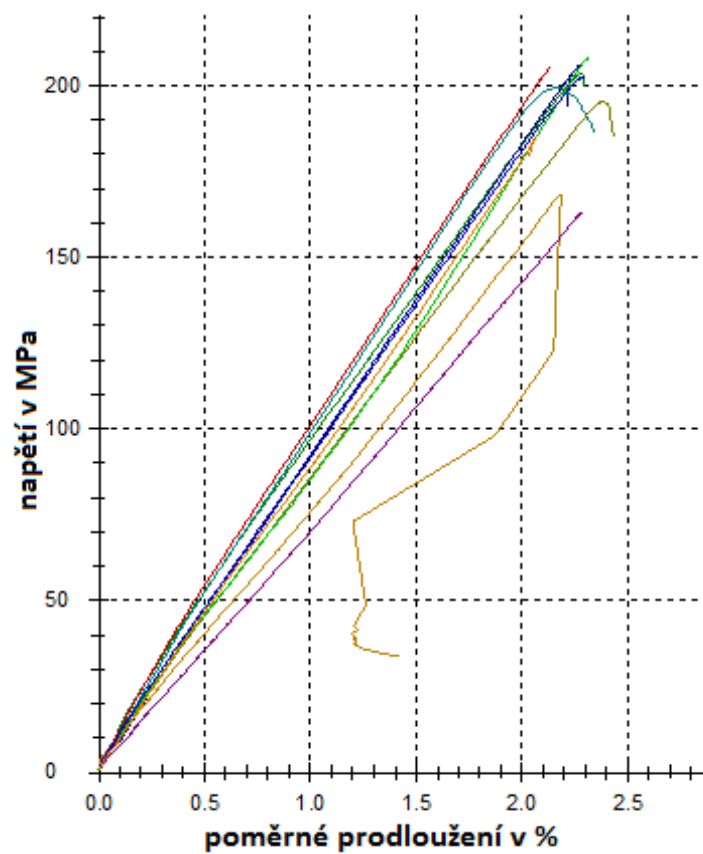
Tabulka 26. Pro skelnou výztuž – třívrstvý laminát

s3	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
S3_1	0,75	20	197	2,3	8830
S3_2	0,74	20	203	2,1	10100
S3_3	0,7	20	233	2,4	8970
S3_4	0,72	20	216	2,2	9480
S3_5	0,75	20	201	2,1	10700
S3_6	0,75	20	185	2,2	8840
S3_7	0,77	20	190	2,2	9630
S3_8	0,72	20	202	2,1	9700
S3_9	0,72	20	224	2,1	11200
S3_10	0,72	20	204	2,2	9950



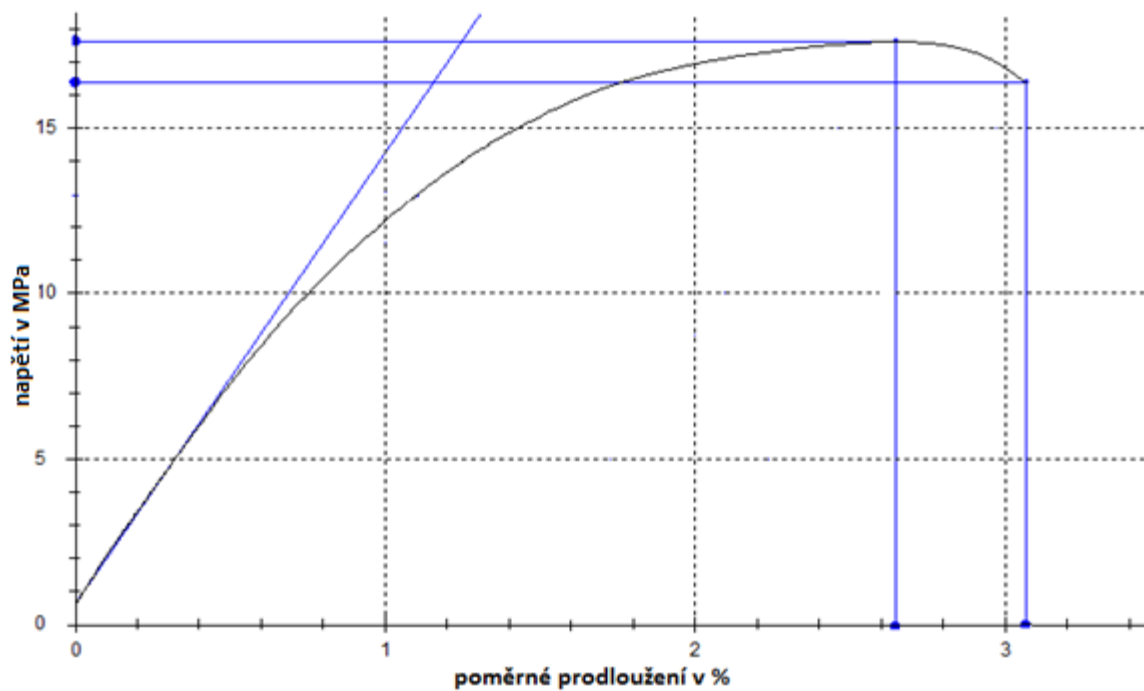
Tabulka 27. Pro skelnou výztuž – čtyřvrstvý laminát

s4	a	b	σ_M	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
S4_1	0,96	20	204	2,3	10800
S4_2	0,85	20	206	2,3	9190
S4_3	1	20	168	2,2	7550
S4_4	0,79	20	163	2,3	7010
S4_5	0,93	20	199	2,2	10400
S4_6	1	20	195	2,4	9030
S4_7	0,97	20	205	2,1	11100
S4_8	1	20	208	2,3	9090
S4_9	0,99	20	203	2,3	9500
S4_10	1	20	185	2,1	9210



Tabulka 28. Pro etalon

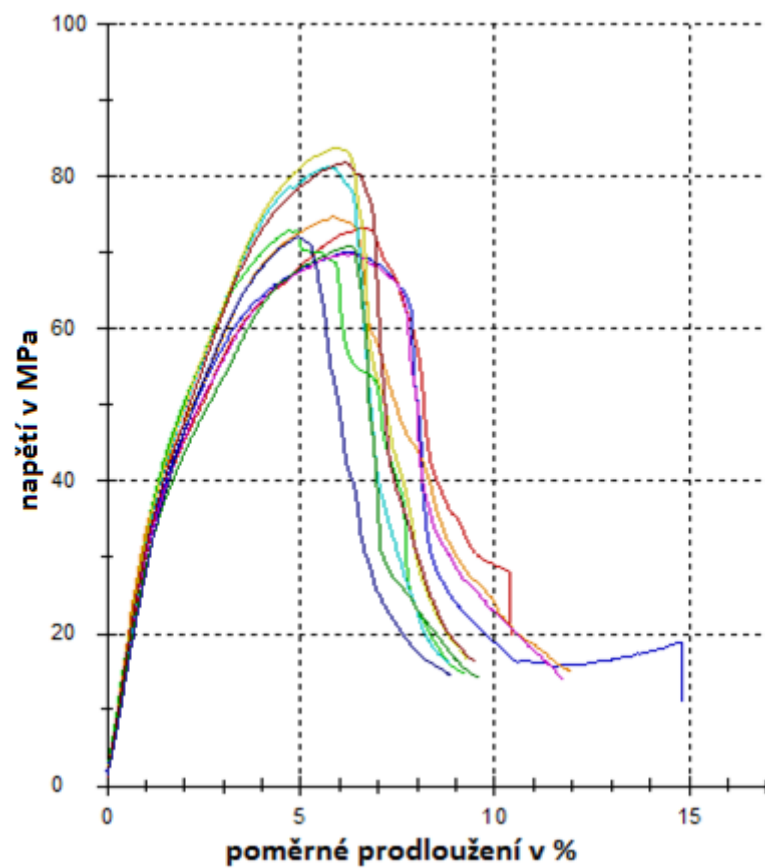
PP TATREN	a	b	σ_M	ϵ	E
etalon	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
E_1	0,65	20	18,1	3,2	1350
E_2	0,65	20	19	2,7	1430
E_3	0,65	20	18,1	2,1	1410
E_4	0,65	20	17,4	3,2	1330
E_5	0,65	20	17,6	2,6	1360
E_6	0,65	20	17,7	2,1	1390
E_7	0,65	20	18,3	2,6	1400
E_8	0,65	20	16,9	1,9	1370
E_9	0,65	20	18	4,1	1350
E_10	0,65	20	17,9	2,3	1390



PŘÍLOHA P3: ZKOUŠKA OHYBEM - JEDNOTLIVÁ MĚŘENÍ

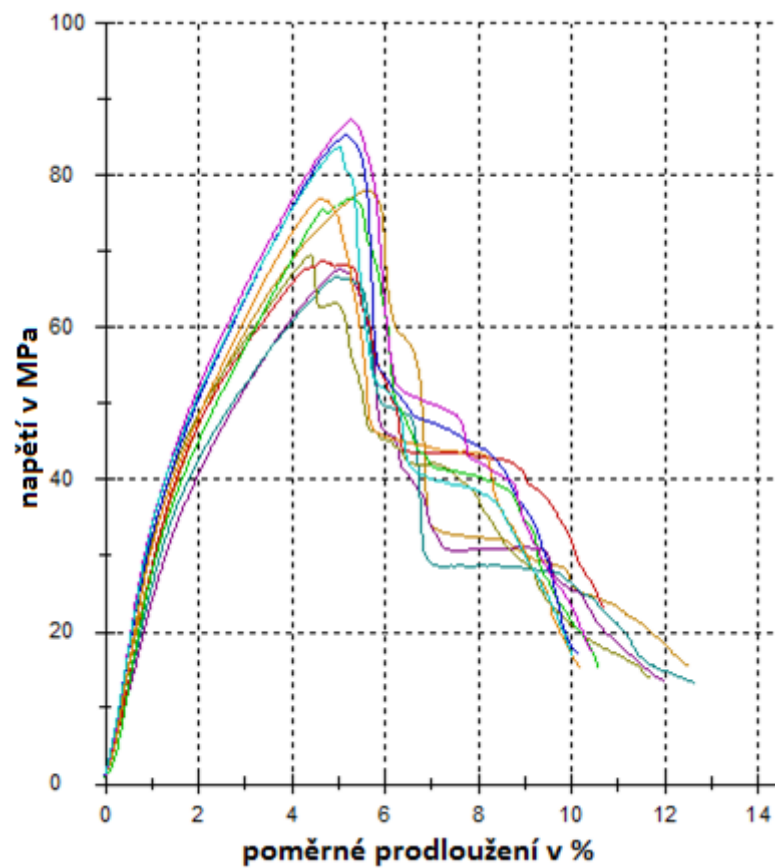
Tabulka 16. Pro jutovou výztuž - dvouvrstvý laminát

j2	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
J2_1	1,25	20	73,3	6,7	2480
J2_2	1,25	20	73	4,7	2960
J2_3	1,25	20	70,1	6,4	2590
J2_4	1,25	20	74,8	5,8	2820
J2_5	1,25	20	69,8	6,3	2410
J2_6	1,4	20	81,3	5,7	2450
J2_7	1,4	20	83,7	6	2560
J2_8	1,4	20	81,7	6,1	2920
J2_9	1,4	20	70,8	6,2	2400
J2_10	1,4	20	72	4,9	2360



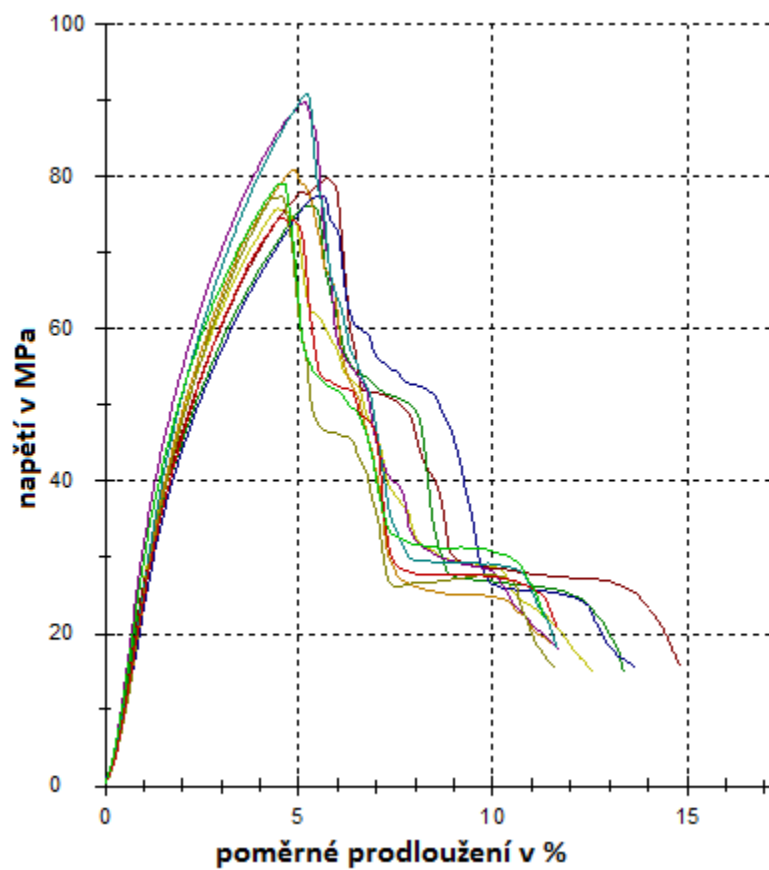
Tabulka 17. Pro jutovou výztuž – třívrstvý laminát

j3	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
J3_1	1,85	20	78	5,6	2560
J3_2	1,85	20	67,7	5	2010
J3_3	1,85	20	66,6	4,9	2250
J3_4	1,85	20	69,5	4,4	2320
J3_5	1,85	20	68,7	4,6	2070
J3_6	1,75	20	76,9	5,2	1420
J3_7	1,75	20	85,2	5,2	2910
J3_8	1,75	20	76,9	4,6	2100
J3_9	1,75	20	87,3	5,3	2900
J3_10	1,75	20	83,7	5	2880



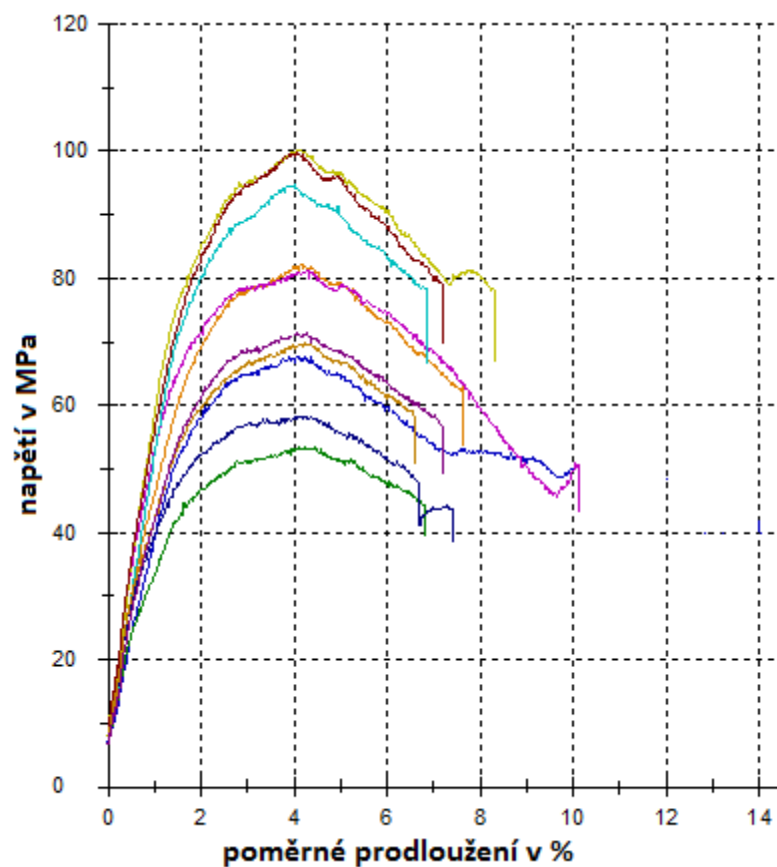
Tabulka 18. Pro jutovou výztuž – čtyřvrstvý laminát

j4	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
J4_1	2,5	20	75,8	4,4	1790
J4_2	2,5	20	79,8	5,7	1560
J4_3	2,5	20	76,2	5,3	1500
J4_4	2,5	20	77,4	5,6	1370
J4_5	2,5	20	80,9	4,9	1510
J4_6	2,5	20	89,7	5,1	1810
J4_7	2,5	20	90,8	5,2	1610
J4_8	2,5	20	77,5	4,6	1300
J4_9	2,5	20	74,6	4,5	1190
J4_10	2,5	20	79,1	4,5	1880



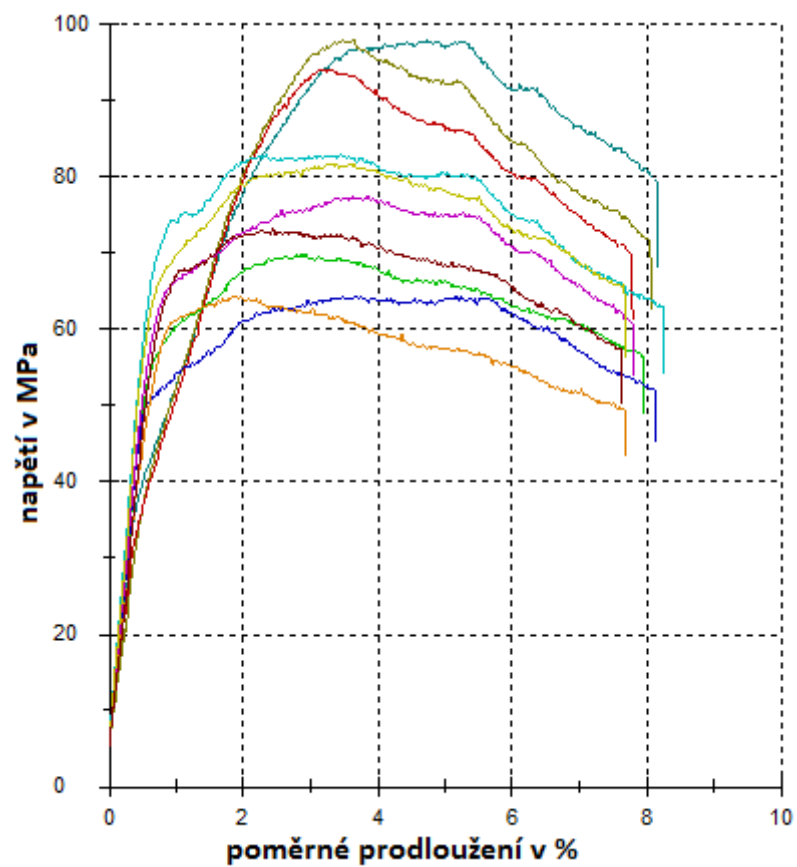
Tabulka 19. Pro skelnou výztuž - dvouvrstvý laminát

s2	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
S2_1	0,62	20	67,6	4,1	2670
S2_2	0,62	20	82,4	4,1	3470
S2_3	0,62	20	81,4	4,3	4340
S2_4	0,62	20	94,7	4	3800
S2_5	0,62	20	100	4,2	4040
S2_6	0,62	20	99,8	4,1	4470
S2_7	0,62	20	53,4	4,1	2920
S2_8	0,62	20	58,4	4	3740
S2_9	0,62	20	69,8	4,2	3910
S2_10	0,62	20	71,4	4,1	3220



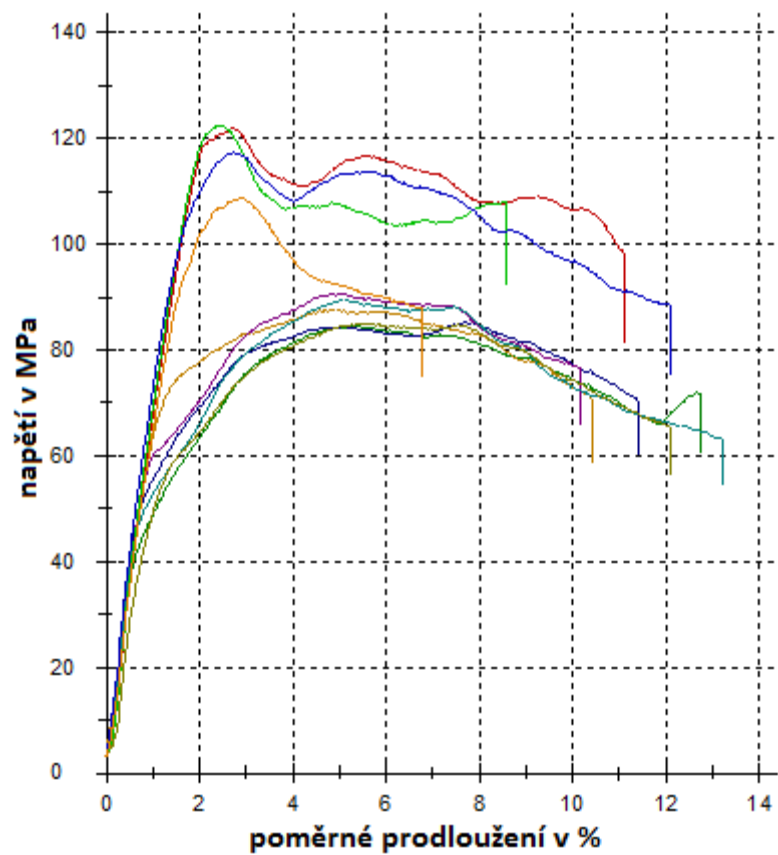
Tabulka 20. Pro skelnou výztuž - třívrstvý laminát

s3	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
S3_1	0,72	20	97,8	4,7	7460
S3_2	0,72	20	98	3,6	6040
S3_3	0,72	20	94	3,2	6410
S3_4	0,72	20	69,9	2,9	8590
S3_5	0,72	20	64,4	5,2	8660
S3_6	0,72	20	64,4	1,9	7370
S3_7	0,72	20	77,6	3,8	8900
S3_8	0,72	20	83	3,3	9970
S3_9	0,72	20	81,7	3,2	9450
S3_10	0,72	20	73,2	2,5	7310



Tabulka 21. Pro skelnou výztuž - čtyřvrstvý laminát

s4	a	b	σ_{Mf}	ϵ	E
n = 10	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
S4_1	0,95	20	84,5	5,3	6040
S4_2	0,95	20	85,2	7,7	6390
S4_3	0,95	20	87,9	4,9	6000
S4_4	0,95	20	90,7	5	4550
S4_5	0,95	20	89,5	5	5850
S4_6	0,95	20	85,2	5,6	2270
S4_7	0,95	20	122	2,7	4470
S4_8	0,95	20	123	2,5	4510
S4_9	0,95	20	117	2,7	6770
S4_10	0,95	20	109	2,9	5660



PŘÍLOHA P4: TESTXPERT II



testXpert® II - the ergonomic user interface

Layout change

Rapid change to different layouts.

Curve graphs

Result labeling, intelligent zoom functions, reticle and completely freely configurable curve graphs.

Statistics table

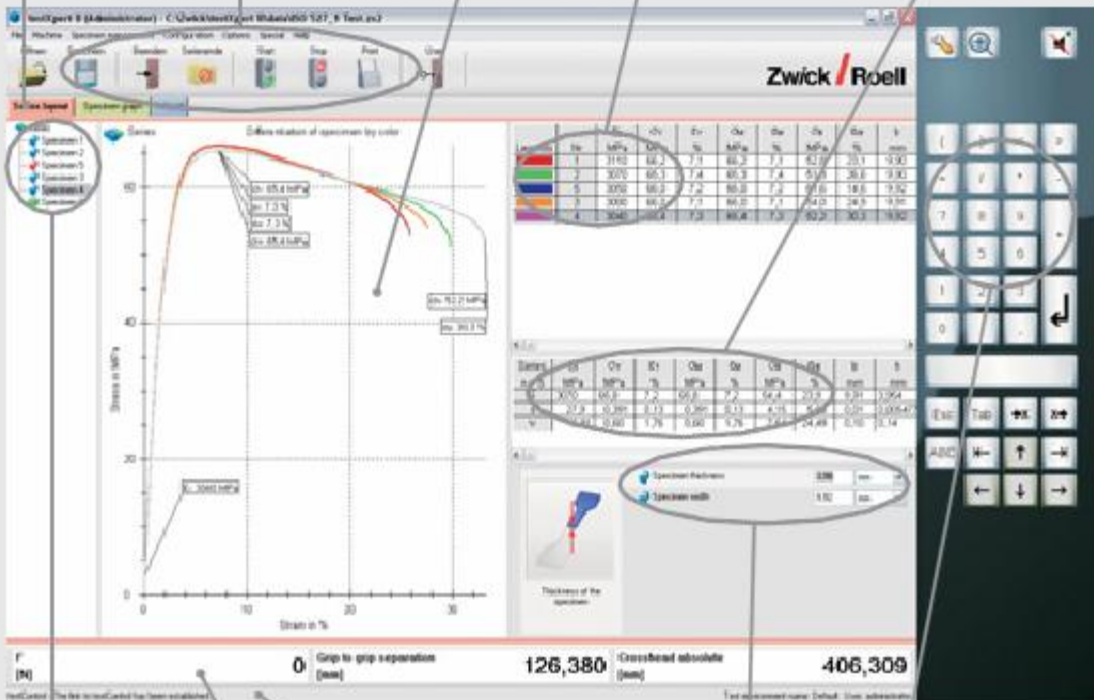
A wide range of statistical expressions from standard deviation to CMK index covers all requirements.

Toolbar

Key functions at a glance

Results table

Tolerance and anomaly monitoring, free configuration and key.



Specimen list

Clear display of specimen and series structure.

Status display

The status indicator provides detailed information to the operator regarding the current test process.

Touch panel

Alphanumeric panel enables efficient parameter setting and navigation.

Channel display

All the key measurement channels at an glance.

Specimen-specific parameters

All specimen-specific parameters can be input directly in the test layout.