

Uplatnění kompozitních materiálů v konstrukci dopravních prostředků

Bc. Ondřej Gergela

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Gergela**
Osobní číslo: **T16132**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Uplatnění kompozitních materiálů v konstrukci dopravních prostředků**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická část
2. Literární rešerše v oblasti polymerních kompozitních materiálů.
3. Význam a využití polymerních kompozitních materiálů v konstrukci dopravních prostředků.
4. Požadavky na konstrukce v dopravním průmyslu.
5. Popis zpracovatelských technologií vhodných pro výrobu kompozitních materiálů.
6. Experimentální část
7. Návrh materiálového složení kompozitní konstrukce pro zvolenou aplikaci.
8. Experimentální výroba kompozitních materiálů dle zvolené technologie.
9. Testování mechanických vlastností navržených kompozitních materiálů.
10. Vyhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro další výzkum a testování.
11. Závěr diplomové práce a diskuze dosažených výsledků.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

dle doporučení vedoucího diplomové práce

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

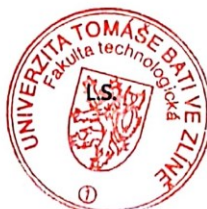
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2018**

Ve Zlíně dne 2. února 2018



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



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

Přijetí a jméno: GERGELA ONDŘEJ

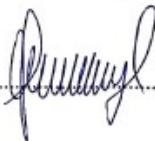
Obor: PI - VI

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 10.4.2018



.....

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 nevyjádřeně 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 nahlédnutí 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, užití-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 užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá modifikací vysoce pevnostních kompozitních materiálů a obsahuje část teoretickou a experimentální. Teoretická část se zabývá kompozitními materiály a jejich využitím zejména v dopravních prostředcích. Vlákná, vyztužení a matrice mají velký vliv na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů vyrobených technologií pultruze. Kompozitní materiály jsou mechanicky namáhány a musejí odolávat nepříznivým vlivům prostředí. Z těchto důvodů byly kompozitní materiály podrobeny statickým a dynamickým zkouškám (3 - bodový ohyb, interlaminární smyková pevnost, rázová zkouška Charpy a rázová zkouška pádem-padostroj. V experimentální části byly popsány jednotlivé zkoušky, normy a bylo provedeno statistické vyhodnocení.

Klíčová slova: Pultruze, kompozitní materiály, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This Master's thesis describes modification of high strength composite materials and contains a theoretical and a experimental part. The theoretical part of the thesis includes description of composite materials and its utilization in transportation especially. Fibers, reinforcement and matrix have a huge effect on mechanical properties of composite parts manufactured by a technology of pultrusion. Composite materials are mechanically stressed and thus are also supposed to resist the adverse environmental impact. Therefore, composite specimens were subjected to a static and impact testing 3-point bending, interlaminar shear strength, Charpy impact test and pad drop impact test. The selected testing methods are covered in experimental part of this Master's thesis including and obtained results were statistically evaluated.

Key words: Pultrusion, composite materials, mechanical properties

Rád bych tímto poděkoval své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za cenné zkušenosti, trpělivost, obětavý přístup, odborné vedení a důležité informace, které mi byly přínosné pro vypracování práce. Dále bych rád poděkoval regionálnímu výzkumnému centru CEBIA-Tech především Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D. za spolupráci a technickou podporu. V neposlední řadě bych tímto také velice rád poděkoval společnosti 5M, s.r.o., která mi poskytla materiály a možnosti k tomu, aby byla vypracována tato studie. V poslední řadě bych rád poděkoval své manželce a svým dvěma synům, bez kterých bych nebyl tam, kde jsem.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍCH MATERIÁLY	12
1.1 DEFINICE KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	12
1.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY A JEJICH ROZDĚLENÍ	14
1.2.1 Specifika kompozitních materiálů.....	17
1.3 VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH	18
1.4 POŽADAVKY NA KONSTRUKCI V DOPRAVNÍM PRŮMYSLU	20
2 VLÁKNA, VÝZTUŽE, MATRICE A JEJICH ÚKOL V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH	22
2.1 VLÁKNA.....	22
2.1.1 Skleněná vlákna (rovingy)	23
2.1.1.1 Vlastnosti skleněných vláken.....	24
2.1.2 Uhlíková vlákna	25
2.1.2.1 Shrnutí vlastností uhlíkových vláken.....	26
2.2 VÝZTUŽ.....	27
2.3 MATRICE	28
2.3.1 Polymerní matrice	29
2.3.2 Akrylátová matrice.....	30
2.3.3 Polyesterové matrice	30
2.3.4 Polyuretanová matrice.....	32
3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	33
3.1 MECHANISMUS PORUCH	34
3.2 STATICKÉ ZATÍŽENÍ KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	35
3.3 TEPLOTA SKELNÉHO PŘECHODU TG	36
3.4 PROVEDENÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY	37
3.4.1 Mechanické zkoušky za teplot odlišných od okolí	37
4 TECHNOLOGIE PULTRUZE	39
4.1 PULTRUZE	39
4.2 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY.....	41
4.2.1 Ostatní technologie výroby pultruze	44
4.3 VYUŽITÍ TECHNOLOGIE VÝROBY PULTRUZE	45
4.4 DALŠÍ POPIS ZPRACOVATELSKÝCH TECHNOLOGIÍ VHODNÝCH PRO VÝROBU KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	46
4.4.1 Ruční laminace za mokra	46
4.4.2 Technologie RTM (Resin Transfer Molding).....	46
4.4.3 Laminace pod fólií (plachetkou)	47
II PRAKTICKÁ ČÁST	48
5 CÍL PRÁCE	49
6 TECHNOLOGIE PULTRUZE A PRINCIP VÝROBY TESTOVANÝCH VZORKŮ	50

6.1	PRINCIP VÝROBY PULTRUZNÍCH PROFILŮ FIRMOU 5M S.R.O.....	51
6.2	PULTRUZNÍ VÝROBNÍ LINKA FIRMY 5M S.R.O.....	52
7	POPIS PROVEDENÝCH ZKOUŠEK	55
7.1	ČSN EN ISO 178 - PLASTY - STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	55
7.2	ASTM D 2344 - ZKOUŠKA ILSS (INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH) – INTERLAMINÁRNÍ SMYKOVÁ PEVNOST	57
7.3	ČSN EN ISO 179 - STANOVENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY	58
7.4	ČSN EN ISO 6603 - PLASTY - STANOVENÍ CHOVÁNÍ TUHÝCH PLASTŮ PŘI VÍCEOSÉM RÁZOVÉM NAMÁHÁNÍ - METODA PADAJÍCÍHO TLOUKU.....	59
8	MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ VZORKŮ	60
8.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	60
9	TESTOVACÍ STROJE A JEJICH CHARAKTERISTIKY.....	62
10	VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK.....	65
10.1	ČSN EN ISO 178 - PLASTY - STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	66
10.1.1	Profil s akrylátovou matricí.....	66
10.1.2	Profil s polyesterovou matricí	67
10.1.3	Profil s polyuretanovou matricí.....	68
10.2	ASTM D 2344 - ZKOUŠKA ILSS (INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH) – INTERLAMINÁRNÍ SMYKOVÁ PEVNOST	70
10.2.1	Profil s akrylátovou, polyesterovou a polyuretanovou matricí	70
10.3	ČSN EN ISO 179 - STANOVENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY	72
10.3.1	Profil s akrylátovou matricí.....	72
10.3.2	Profil s polyesterovou matricí	74
10.3.3	Profil s polyuretanovou matricí.....	76
10.4	ASTM 5628 (ISO 6603) - RÁZOVÁ ZKOUŠKA PÁDEM – PADOSTROJ.....	78
10.4.1	Profil s akrylátovou, polyesterovou a polyuretanovou matricí	78
11	DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	82
11.1	ČSN EN ISO 178 - PLASTY - STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	82
11.2	ASTM D 2344 - ZKOUŠKA ILSS (INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH) – INTERLAMINÁRNÍ SMYKOVÁ PEVNOST	84
11.3	ČSN EN ISO 179 - STANOVENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY	85
11.4	ČSN EN ISO 6603 – PLASTY - STANOVENÍ CHOVÁNÍ TUHÝCH PLASTŮ PŘI VÍCEOSÉM RÁZOVÉM NAMÁHÁNÍ - METODA PADAJÍCÍHO TLOUKU.....	87
	ZÁVĚR	88
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	90
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	93
	SEZNAM OBRÁZKŮ	94
	SEZNAM TABULEK.....	97
	SEZNAM GRAFŮ	98
	SEZNAM PŘÍLOH.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi kompozitních materiálů, které jsou složeny ze skelné výztuže a matrice (polyuretanové, akrylátové a polyesterové). Použité pryskyřice jsou vybrány zejména z důvodu jejich kompatibility ke skelnému vláknu a jejich častému použití ve výrobě.

Cílem této diplomové práce je ověření vlivu změn jednotlivých matic na výsledné vlastnosti kompozitu, a to se zaměřením na soudržnost výztuža-matrice. Tato problematika je honosně popisována v odborné literatuře z pohledu nejen mechanických vlastností, ale i chemické odolnosti. Tato práce se zabývá pouze mechanickými vlastnostmi kompozitních materiálů.

Teoretická část se zabývá všeobecným popisem kompozitních materiálů. Je zaměřena na výztuže ze skleněných vláken, jejich výrobu a vlastnosti. Následně je popsán význam a použití jednotlivých materiálů v dopravních prostředcích. Jejich využití je převážně v interiéru kolejových a silničních vozidel. V dnešní době vysoce roste množství a využití kompozitních profilů ve všech průmyslových oblastech.

V experimentální části se zaměříme na materiálové složení kompozitní konstrukce pro zvolenou aplikaci, experimentální výroba dle zvolené technologie, testování jednotlivých mechanických vlastností navržených kompozitních materiálů na základě využití normalizovaných zkoušek dle platných norem (ISO, ASTM a ČSN). Vyhodnocení dosažených výsledků povede k doporučení pro další výzkum a testování.

Toto téma využila společnost 5M, s.r.o. jako podpůrnou část jejich nově vzniklé výroby na použití jednotlivých dílů pro interiér kolejových vozidel. Tyto materiály byly v dřívější době využívány jen ve velmi specifických oblastech, avšak technologický pokrok způsobuje jejich rozsáhlejší dostupnost. Další možnosti zpracování a využití specifických kompozitních materiálů povede ke speciálnímu testování těchto materiálů s rozšířením do nových průmyslových oblastí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍCH MATERIÁLY

V oblasti kompozitních materiálů není dostupná jiná skupina materiálů, která nabízí tak širokou oblast využití, jako vláknové kompozity. Tyto materiály plní funkci konstrukce od jednoduchých technických aplikací v ruční nebo kusové výrobě, až po extrémní aplikace pro vesmír (kosmonautika) nebo letecký průmysl. Tento rozsah je tak značný, a tím dává těmto materiálům velmi bohatou výhodu. [1]

1.1 Definice kompozitního materiálu

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky odlišných fází. Nespojité složka je tuhá, tvrdá a pevná (výztuž). Spojitá složka, která vykonává funkci pojiva výztuže, se nazývá (matrice). Podle dnešního chápání pojmu kompozit musí být u vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splňovány tyto podmínky: [2]

- Podíl výztuže vzhledem k matici musí být vyšší než 5 %
- Vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální a chemické)
- Výztuž je významně pevnější v tahu a převážně tužší, než matrice
- Kompozit musí být připraven složením z více složek

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. Ve všeobecném strojírenském průmyslu mají největší význam mikrokompozitní materiály, u kterých největší příčné rozměry výztuže (vlákna a částice) se pohybují v rozmezí 100 až 102 μm . Oproti kovům a jejich slitinám mají mikrokompozitní materiály o dost menší hustotu, a tedy zajímavý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti v hustotě, kde na základě této definice dosahují velké měrné pevnosti a měrného modulu. Makrokompozity jsou používány převážně ve stavebnictví, například železobeton vyztužený ocelovými pruty. Nanokompozity obsahují částice, kde jejich největší rozměr je v nm. [2]

Definovat kompozitní materiál není vůbec jednoduché, protože jednotlivé materiály se mohou lišit z toho důvodu, že jsou využívány ve několika oblastech a liší se podle účelu jejich použití, ke kterému bylo nutno definici naformulovat. [3]

Ve studiích kompozitních materiálů se zohledňuje několik pohledů, podle kterých se samotné definice konstatují.

Tyto hlediska jsou například: [3]

- Technické
- Legislativní
- Encyklopedijní
- Ekonomické

Poněvadž je velmi těžké hledat definici, která přesně vystihuje podstatu kompozitního materiálu, uvedeme si zde několik definic:

- Kompozity jsou takové heterogenní materiály, u kterých se po smíchání materiálů se zcela odlišnými vlastnostmi vytvoří jedinečná struktura; jestliže se tyto vlastnosti doplňují, vzniká kompozitní materiál s přídatnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky.
- Kompozity jsou multifunkční materiálové systémy, mající vlastnosti, které neposkytuje žádný z jednotlivých materiálů samostatně. Jsou to kohezivní struktury, vytvořené fyzikální kombinací dvou nebo více kompatibilních materiálů, lišících se složením, vlastnostmi a někdy tvarem. Tato definice klade důraz na jejich vícefunkčnost. [3]
- Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (výztužný materiál a příslušná matrice), lišících se pouze tvarem nebo jeho složením. Složky si v nich zachovávají své vymezení (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí nebo nereagují chemicky). Každá uvedená složka může být identifikována fyzikálně a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní. [4]

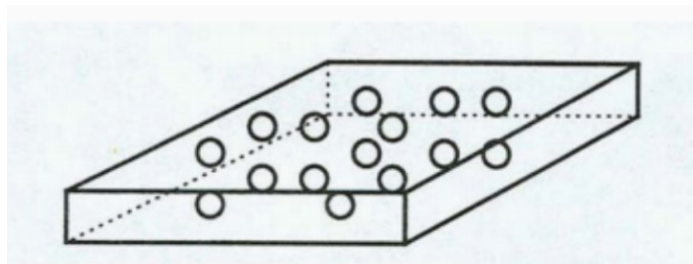
1.2 Kompozitní materiály a jejich rozdělení

Kompozitní materiály můžeme rozlišovat podle typu výztuže, tvaru a uspořádání jejich struktury, technologie výroby apod.

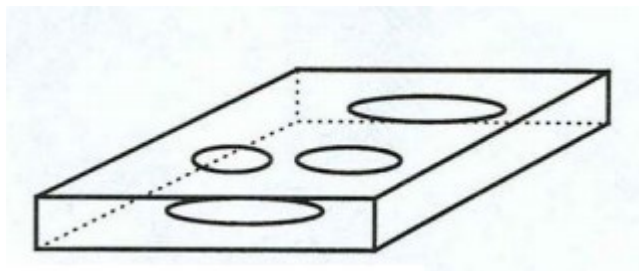
Podle tvaru výztuže: [5] [2]

1. Částicové kompozity:

- a) Sférické částice - izometrické
- b) Destičkové částice - anizometrické



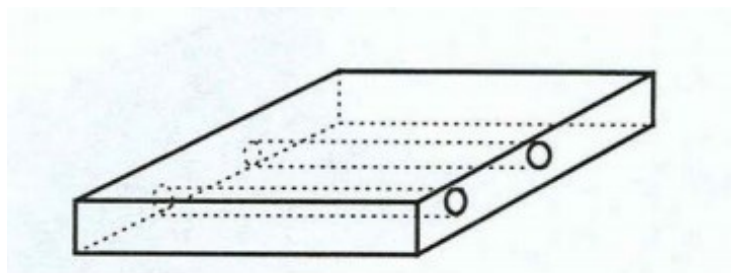
Obr. 1 Částicový kompozit (izometrický) [2]



Obr. 2 Částicový kompozit (anizometrický) [2]

2. Vláknové kompozity:

- a) S kontinuálními vlákny
- b) S krátkými vlákny

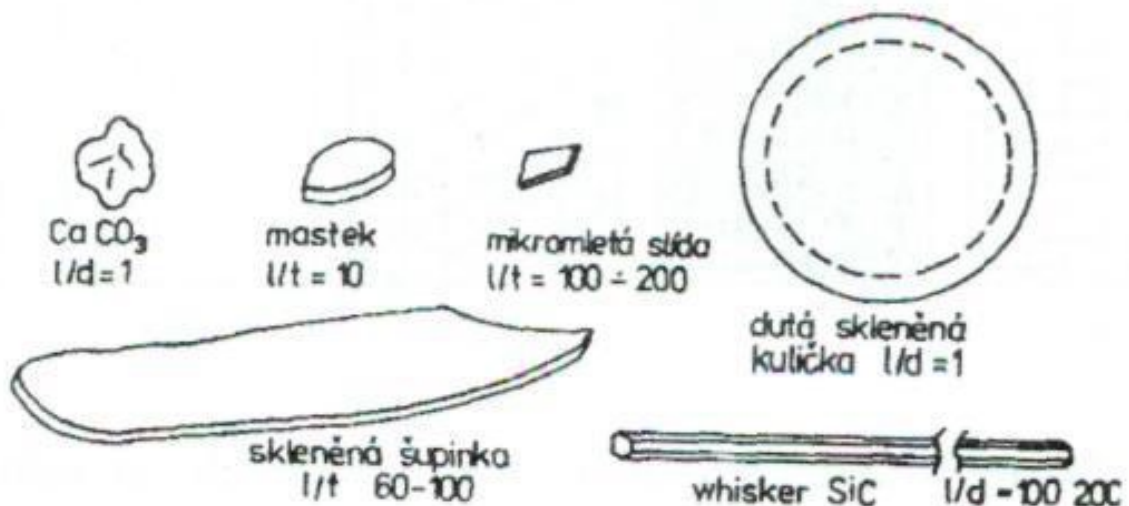


Obr. 3 Vlákenný kompozit [2]

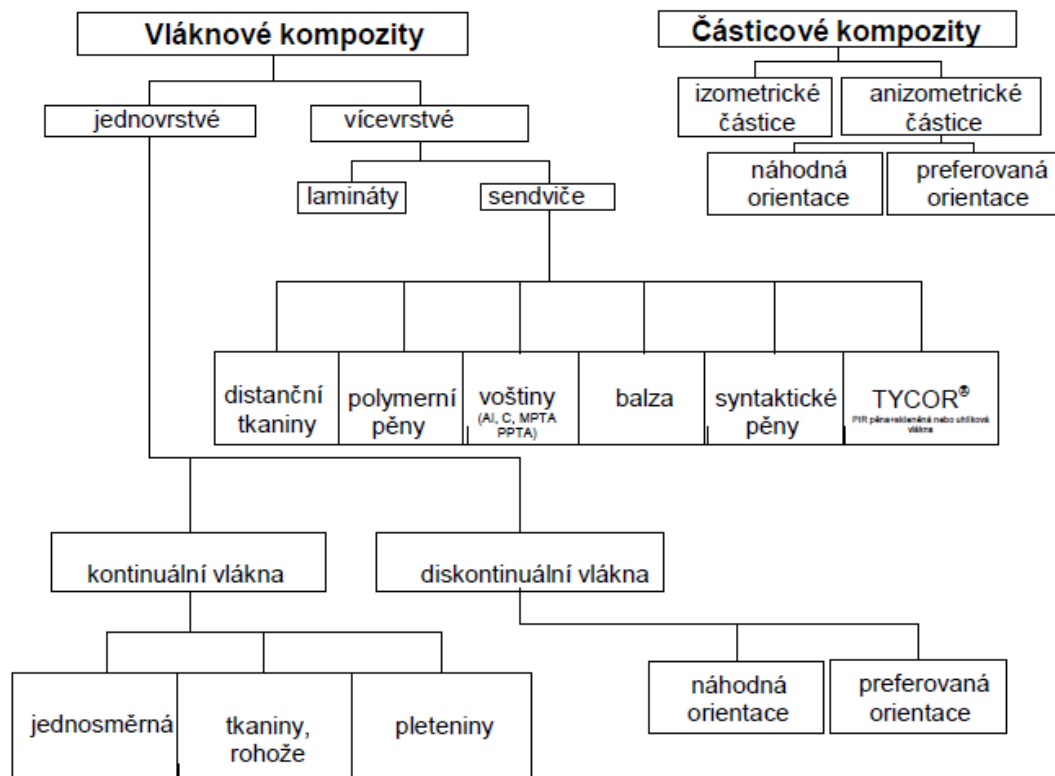
Částice se do polymerních matric přidávají skrze zvětšení tuhosti. Tyto částice sférického tvaru by neměly být příliš velké, aby negativně neovlivňovaly pevnost. Neměly by být ani příliš jemné, protože následně je velmi obtížné dosáhnout jejich rovnoměrného rozptýlení. Nejvhodnější velikost částic je v rozmezí 1 až 10 μm jsou považovány za velké částice. [8]

Částice anizometrické (tvar destiček, disků, jehlic apod.) mohou matrici nejen vyztužovat, ale také významně zpevnit. Jedná se o aktivní částice. Poměr největšího rozměru částice k minimálnímu rozměru udává aspektivní (štíhlostní) poměr. [8]

Největší poměr mají krátká vlákna a whiskery s poměrem délky vůči průměru. Whiskery mají oproti krátkým vláknům jednu výhodu, vzhledem k jejich vysoké tahové pevnosti a malým příčným rozměrům (0,1 až 1 μm .) nedochází při ohybovém namáhání, kterému jsou vystaveny při přípravě kompozitů k jejich lámání. [2]



Obr. 4 Jednotlivé tvary a rozměry částic pro použití vyztužení kompozitu [2]



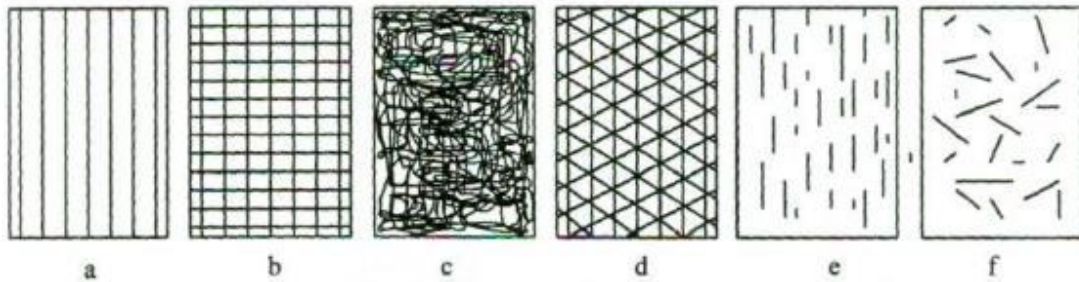
Obr. 5 Dělení kompozitních materiálů [2]

Následující rozdělení mikrokompozitů je možné podle materiálů matrice:

- Polymerní
- Kovová
- Uhlíková
- Skleněná
- Sklokeramická
- Keramická

Struktura vláknových kompozitů:

U kompozitů s kontinuálními vlákny mohou mít výztuže jednosměrnou orientaci, dvouosou, víceosou nebo nahodile uspořádanou. Krátká vlákna (whiskery) mohou být orientovány nahodile nebo uspořádaně. Jednotlivé příklady vláknové výztuže jsou uvedeno na obrázku 6. [2]



Obr. 6 Uspořádání vláknové výztuže v kompozitech a) jednosměrné b) tkaniny c) rohože d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken e) krátká vlákna orientovaná jednosměrně f) krátká vlákna s nahodilou orientací [2]

1.2.1 Specifika kompozitních materiálů

U kompozitních materiálů lze najít několik specifických rysů v jejich chování, se kterými je nutné počítat při navrhování (realizaci) výrobků. [1] [6]

- Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky. Je nutné rozlišovat pevnost vlákna a pevnost tělesa
- Materiál v podobě vláken má několikanásobně vyšší pevnost než stejný materiál ve stejné formě. Čím více je vlákno tenčí, tím je pevnější
- Čím kratší dobu je zatížená část jednotlivého vlákna, tím vyšší je jeho naměřená pevnost
- Kompozitní materiál jako jeden celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně. [6]

1.3 Využití kompozitních materiálů v dopravních prostředcích

V dopravních prostředcích se vlastnosti vyztužených plastů zúročují nejvíce. Lisované výrobky, jako jsou lamináty, se používají jako výztuhy do dílců v silničních a kolejových vozidlech, tažené profily jako díly pro interiér kolejových a silničních vozidel. [6] V současné době je věnována velká pozornost také využití biokompozitů v automobilovém průmyslu. [35]

Uplatnění kompozitních materiálů: [9]

- výroba autobusů (kryt klimatizace, venkovní kryty, držák zavazadel)
- výroba vlaků a tramvají (venkovní střešní a boční kryty, interiérové obložení stropů a stěn, konstrukce podlahového rámu)
- stavebnictví (konstrukce oken a prahů, výztuhy do konstrukcí)
- elektroprůmysl (izolátory, nosné tyče, distanční profily, zkratovací tyče)
- letectví (konstrukční prvky)
- chemické provozy
- konstrukční prvky lehkých staveb
- sportovní potřeby (luky, šípky, hokejové hole), lyže, snowboard
- kosmonautika (konstrukční prvky satelitů a družic)

Výhody kompozitních materiálů: [9]

- rozměrová přesnost
- vysoká pevnost v tahu
- vysoká rázová houževnatost
- vynikající elektroizolační vlastnosti
- nízká teplotní vodivost
- odolnost vůči chemikáliím
- malá teplotní roztažnost
- nízká hustota
- dlouhá životnost
- nízké nároky na údržbu

Kompozitní materiály jsou hlavně díky své váze a vynikajícím odolnostem vůči korozi a chemikáliím používány v mnoha výrobních oborech, kde velká část kompozitních materiálů směřuje hlavně do výroby prostředků hromadné dopravy (autobusy, tramvaje apod.), výroba sportovních potřeb, elektroprůmysl, letectví nebo stavebnictví. [7]



Obr. 7 Vizualizace kolejové soupravy - projekt Siemens RRX [8]



Obr. 8 Vizualizace vnitřního interiéru-projekt Siemens RRX [8]

1.4 Požadavky na konstrukci v dopravním průmyslu

V současné době se kompozitní materiály stávají stále důležitějším prvkem v konstrukci. Kompozity ve velké míře pronikly do leteckého, lodního i automobilového průmyslu, ale v železničním průmyslu je míra použití kompozitů zatím nejmenší. Můžeme ale říct, že postupem času nacházejí a budou nacházet své uplatnění i v tomto odvětví. Hlavní překážkou pro jejich obrovské rozšíření jsou počáteční vysoké náklady na návrhy, výpočty a kontroly v simulačních programech, ale také požadované suroviny a výroba kompozitních součástí. [9]

Jednotlivé požadavky na konstrukci požadovaných výrobků v dopravním průmyslu kompozitních materiálů musí splňovat určitá kritéria, která splňují různé normy z hlediska lepení DIN 6701 a nehořlavosti EN 45 545. [8]



Obr. 9 Vizualizace tramvaje projekt-Bombardier [8]

2 VLÁKNA, VÝZTUŽE, MATRICE A JEJICH ÚKOL V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH

Ve vláknitých kompozitních materiálech jsou základními stavebními prvky především vlákna (výztuže) a matrice. Nejčastější vláknitou výztuží jsou vlákna skleněná. Matrice je nejčastěji polyesterová, akrylátová, epoxidová a polyuretanová.

2.1 Vlákna

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

Pro kompozity jsou vyráběna vlákna:

- Skleněná
- Uhlíková
- Polymerní
- Keramická
- Kovová

Dlouhá vlákna se dodávají na navinuté cívce, ve formě rovingu nebo ve formě tkaných textilií a rohoží. Polymerní matrice se vyztužují kovovými nebo keramickými vlákny pouze jen ve speciálních případech, například vysokoteplotní aplikace, a to z důvodu vysoké ceny a vysoké hustoty. Mnohem častěji se používají vlákna skleněná než uhlíková. [1]

2.1.1 Skleněná vlákna (rovingy)

Skleněné vlákno je určený název pro tenká vlákna, jejichž průměr se pohybuje mezi 3,5 - 24 μ m. Tato vlákna mají pravidelnou kruhovitou geometrii. Jsou tažena z roztavené skloviny a používají se pro textilní účely. Jsou nejčastěji používaný druh pro výrobu vláken. Vlákna již mají podíl na téměř skoro 90 % trhu. Skleněná vlákna jsou na základě své amorfní struktury na rozdíl od vláken uhlíkových a aramidových izotropní. [1]



Obr. 10 Navinutá cívka (roving) [9]

Tab. 1 Specifikace a potřebné vlastnosti neupravených vláken [1]

Sklovina	E	R nebo S	C	ECR	AR
Složení (%)					
SiO ₂	54	60	60 až 65	54 až 62	62
Al ₂ O ₃	14 až 15	25	2 až 6	12 až 13	-
CaO	-	14	14	21	5 až 9
MgO	20 až 24	3	1 až 3	4,5	1 až 4
B ₂ O ₃	6 až 9	<1	2 až 7	<0,1	<0,5
K ₂ O	<1	<1	8	0,6	-
Na ₂ O	-	-	-	-	12 až 15
Vlastnosti					
Hustota (g.cm ⁻³)	2,6	2,53	2,52	2,27	2,68
Mez pevnosti v tahu (N.mm ⁻²)	3400	4400	2400	3440	3000
E-modul (N.mm ⁻²)	73000	86000	70000	73000	73000
Poměrné prodloužení (%)	<4,8	<4,6	<4,8	<4,8	<4,4
Teplota měknutí (°C)	850	980	750	880	770

2.1.1.1 Vlastnosti skleněných vláken

- Pevnost v tahu = 3500 N.mm⁻² (surové vlákno); 1500 N.mm⁻² (po zpracování)
- E – modul = 75000 N.mm⁻²
- Mají nízkou cenu, vysokou tuhost a pevnost
- Vysoká pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti, dobrá ohybová pevnost
- Odolávají vysokým teplotám, vnějšímu prostředí a vodě
- Modul pružnosti v tahu je přibližně stejný jako u hliníku a činí asi přibližně 1/3 hodnoty oceli
- Tepelné vlastnosti skleněných vláken převyšují tepelné vlastnosti ostatních materiálů
- Skleněná vlákna jsou nehořlavá (žárovzdorná). [1] [10] [36]

2.1.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou považována za technická vlákna s nejširším spektrem mechanických vlastností. Uhlík při styku s kovy vytváří galvanický článek. Jsou extrémně vysoce pevná, tuhá a mají nízkou tažnost.

Výchozí suroviny pro výrobu: [1] [3]

- Smola – vlákna, u kterých vznikají vysoké náklady vysoké náklady. Finální cena je vzhledem k nízké ceně suroviny výchozí. E-modul vláken je velmi vysoký. Má velmi dobré tepelné a elektrické vlastnosti.
- Polyakrylonitrid (PAN) – vlákna, která jsou považována za vlákna standardní
- Celulóza – vlákna, která mají nedokonalou strukturu. Jejich použití je jako izolační materiál pro podmínky s vysokými teplotami.

Uhlíková vlákna se skládají z více než 90 % z uhlíku, přibližně 7 % dusíku, 1 % kyslíku a 0,3 % vodíku. Jejich průměr je 5 a 10 μm . E-modul a pevnost se může změnit v širokém rozsahu. Závislé jsou na stupni orientace uhlíkových vrstev a také na výskytu vadných míst, které vzniknou ve vláknech během výroby. [1]



Obr. 11 Uhlíková vlákna [11]

2.1.2.1 Shrnutí vlastností uhlíkových vláken

- vysoký modul pružnosti, tepelná odolnost a pevnost
- odolnost vůči únavě materiálu a dobrá elektrická vodivost
- výborně tlumí vibrace, chemicky odolné a nemění příliš své vlastnosti až do teploty přibližně 2000 °C
- uhlíková vlákna mají oproti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, se zvyšujícím se zatížením roste hodnota E-modulu
- nižší hustota
- vysoká korozní odolnost
- v porovnání se skleněnými vlákny jsou vysoce anizotropní
- za normálních podmínek jsou velmi křehká a při zpracování mají snahu k lámavosti. [1] [3]
-

Tab. 2 Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních mat. [2]

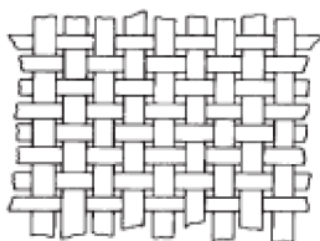
Materiál	Modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [GPa]
Skleněné vlákno E	73	2500
Sklovina E	73	100
Uhlíkové vlákno	230 - 950	2000 - 6000
Polykrystalický grafit	10	20
Keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
UHMW polyethylenové vlákno	90 - 170	3000
Lineární polyethylen	0,4	26

2.2 Výztuž

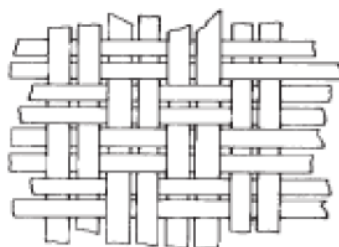
Samotná vlákna jsou vždy o mnoho pevnější než stejný materiál v kompaktní podobě. Pevnost těchto vláken roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty struktury jsou u vláken, které mají malé průřezy, navíc jsou orientovány příznivě svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. Pevnost vlákna závisí také samozřejmě na jeho délce. Části, které vzniknou porušením vlákna při tahovém namáhání, mají větší pevnost než vlákno, které bylo původní. K prvnímu lomu dojde z největšího defektu vlákna. Většina vláken, která se vyrábí, má kruhový průřez o průměru od 5 do 20 μm . Použití menších průměrů se nedoporučuje z technických důvodů. Produkty, které jsou vytvořeny tenkými vlákny, se velice těžce prosycují matricí. [2]

Příklady výztuží:

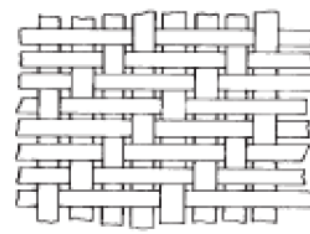
- Roving
- Tkanina
- Rohož
- Prepreg



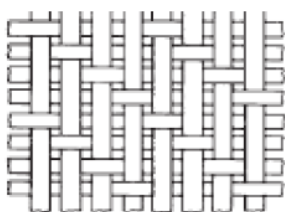
Plátnová vazba



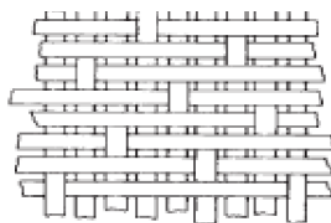
Košíková vazba



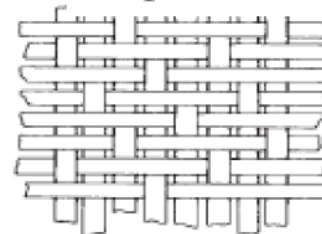
Keprová vazba



Crowfootův atlas



8 vazný atlas



5 vazný atlas

Obr. 12 Druhy jednotlivých vazeb tkanin [2]

2.3 Matrice

Matrice je surovina, která je prosycena systémem vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarový výrobek. Tento výrobek se označuje jako kompozit. Smyslem matrice u vláknových kompozitů je zaručení požadovaného geometrického tvaru výrobku, převedení namáhání z vlákna na vlákno, ochrana vláken, zavedení a přenos namáhání na vlákna aj. Matrice mohou být kovové, polymerní a keramické. [1] [12]

Jakost kompozitu ovlivňuje zásadním způsobem jakost prosycení pryskyřice, vzhledem k vyztužujícímu materiálu. Fázové rozhraní, matrice-vlákno, označujeme místo, kde dochází ke kontaktu výztuže a pryskyřice. Tuto nežádoucí vlastnost eliminujeme použitím apretačního systému. [1] [12]

Pojivo by měla matrice udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení vláken. Požadavky tohoto typu splňují matrice kovové a polymerní. [2]

V této diplomové práci se zabýváme obzvláště pak maticí polyesterovou, akrylátovou a polyuretanovou. A to hlavně z důvodu, že zkušební vzorky, jsou vyrobeny právě z těchto druhů matic.

- Ochrana vláken před okolím
- Namáhání z vlákna na vlákno
- Namáhání na vlákna
- Zajištění geometrické polohy vláken a tvarová stálost

2.3.1 Polymerní matrice

Nejpoužívanější pro kompozity s kontinuálními vlákny jsou matrice. Převážně polymerní termoplastické nebo reaktoplastické. Vysokou viskozitu mají pryskyřice termoplastické, což je výrobně nevýhodné. Můžou vznikat vzduchové bubliny nebo nedostatečnému smočení jednotlivých pramenců vláken. Z důvodu těchto problémů se převážně používají reaktoplastické matrice. [1] [2] [13]

Nejpoužívanější jsou:

- Epoxidy
- Vinylestery
- Nenasycené polyestery
- Polyuretan
- Akrylát

Nejpoužívanější z termoplastů jsou:

- Polypropyleny
- Polyamidy

Aromatické termoplasty a reaktoplasty s vysokou teplotou tvarové stálosti se díky své ceně používají především v armádě. [1] [2] [13]

Při výběru vhodné pryskyřice se musíme zaměřit na následující vlastnosti:

Tab. 3 Důležité vlastnosti pro výběr pryskyřice

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

2.3.2 Akrylátová matrice

Injektážní a infuzní technologie potřebují pryskyřice s co nejnižší viskozitou, a proto se do nich musí přidat přibližně 30 - 50 % styrenu. Tímto se však negativně ovlivní emise styrenu při výrobě. Z tohoto důvodu byly vyvinuty pryskyřice bez reakčního ředidla. Jedná se o akrylátové pryskyřice na bázi akryl-esterů, které mají vyšší modul pružnosti a vyšší pevnost v tahu. [14]

2.3.3 Polyesterové matrice

Polyesterové pryskyřice nemají žádné zbarvení jsou bezbarvé, lehce nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech, které se vytvrzují za normální nebo vyšší teploty, aniž by vznikly vedlejší produkty. Při vytvrzování se uvolňuje reakční teplo a následuje objemové smrštění přibližně o 9 %. Lineární molekuly nenasyčené polyesterové pryskyřice obsahují reaktivní dvojně vazby. Polyesterové pryskyřice jsou nenasyčené polyestery, které jsou

rozpuštěné v reaktivním monomeru (styrenu). Pomocí urychlovačů a iniciátorů dochází k vytvrzení pryskyřice.

U mnoha případů jsou nejčastěji používaným materiálem pro kompozitní aplikace, a to především kvůli nízké viskozitě, vysoké rychlosti vytvrzování, dobré smáčivosti vláken a nízké ceně. Více než 70 % je zpracováno ve formě kompozitu. Viskozita pryskyřice je dána obsahem styrenu, který je obsazen v rozsahu 30-50 %. Vhodným výběrem výchozích materiálů a různých přísad lze zaměnit zpracovatelnost a vlastnosti vyrobených hmot ve velkém rozsahu. Přísady se většinou používají jako plnivo, které zlevňuje materiál. Zvyšuje se tím viskozita, která ovlivňuje zatékavost a v poslední řadě i zpracovatelnost. Mezi hlavní plniva patří křída, hydroxid hlinitý a kaolin.

Polyesterové pryskyřice se využívají například na zboží v galanterii (knoflíky), zalévací hmoty, lepidla na podlahové krytiny, nátěrové hmoty jako sanace před vyrovnáním podkladů nebo bižuterie. V technickém odvětví se využívá na výztuže, které jsou skládány na modely a pak jsou impregnovány pryskyřicí. Jedná se zejména o lodě, střešní krytiny, letadla a mnoho dalších [14].



Obr. 13 Trup lodě z polyesterové pryskyřice v praxi [14]

2.3.4 Polyuretanová matrice

Používají se hlavně pro kontinuální proces. Mají vyšší houževnatost než polyester a vinylestery. Jsou odolné vůči únavě. Cena je víceméně stejná, jako u styrenových pryskyřic. V procesu vytvrzování nedochází k uvolňování organických plynných produktů. V předchozích obdobích byly polyuretanové pryskyřice nevhodné kvůli rychlé době vytvrzení a vytváření pěny. V dnešní době je už doba vytvrzení přibližně 20 minut skrze použití dvousložkových polyuretanů. Pevnost smyková mezilaminární je přibližně o 60 % vyšší. Polyuretanová pryskyřice se používá v extrémně širokém sortimentu výrobních produktů, jako jsou kaučuky k lékům. Chcete-li pochopit tento materiál, je nejlepší mít základní pochopení toho, jak jsou vyrobeny polyuretany. Polyuretanová pryskyřice je považována za univerzální, protože může být použita k výrobě řady předmětů, od inkoustu po plasty. To je možné, protože materiál lze manipulovat s extrémními extrémy, které mohou měnit své vlastnosti od měkké pružné gumy po velmi tvrdý a tuhý plast. [15]

V mnoha případech se polyuretanová pryskyřice používá v extrémně širokém sortimentu výrobních produktů. Je považována za univerzální, protože může být použita k výrobě řady předmětů (inkoust, plast). V kapalné formě se vyrábí z důvodu nalití do forem. Při použití pro tento účel je materiál vysoce citlivý, což je pak důsledkem viditelných detailů (trhliny apod.). [15] [37] [38]

3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Zkoušky mechanických vlastností umožňují hodnotit chování materiálů při působení vnějších sil, případně i dalších vlivů. Některé z těchto hodnot mají i fyzikální význam (lze je tedy přepočítat i pro jiný tvar a rozměr). Oblast zkoušení materiálů je nezbytná pro kontrolu jakosti výrobků, ale i k zhodnocení úrovně technologie výroby.

V diplomové práci se zabýváme zkouškami statickými a dynamickými. Zkušební vzorky pak budou následně podrobeny zkouškám. [16]

Rozdělení mechanických zkoušek dle:

- teploty a prostředí
- charakteru zatěžování (statické, dynamické)
- druhu namáhání (tah, tlak, ohyb, krut ap.)
- zjišťovaných vlastností (pevnosti, tvrdosti, únavy ap.)

Pro bezpečnou porovnatelnost a reprodukovatelnost je nutnost tyto zkoušky normovat. Způsob manipulace se vzorky může podstatně ovlivnit zjištěné výsledky (materiál není homogenní a izotropní).

- zkušební kus
- zkušební vzorek – určená plocha k odběru
- volba požadovaných vlastností
- nejvíce exponované místo

Dle normy ČSN se udává počet zkušebních vzorků podle požadovaného množství, druhu výroby, potřeby bezpečnosti atd.

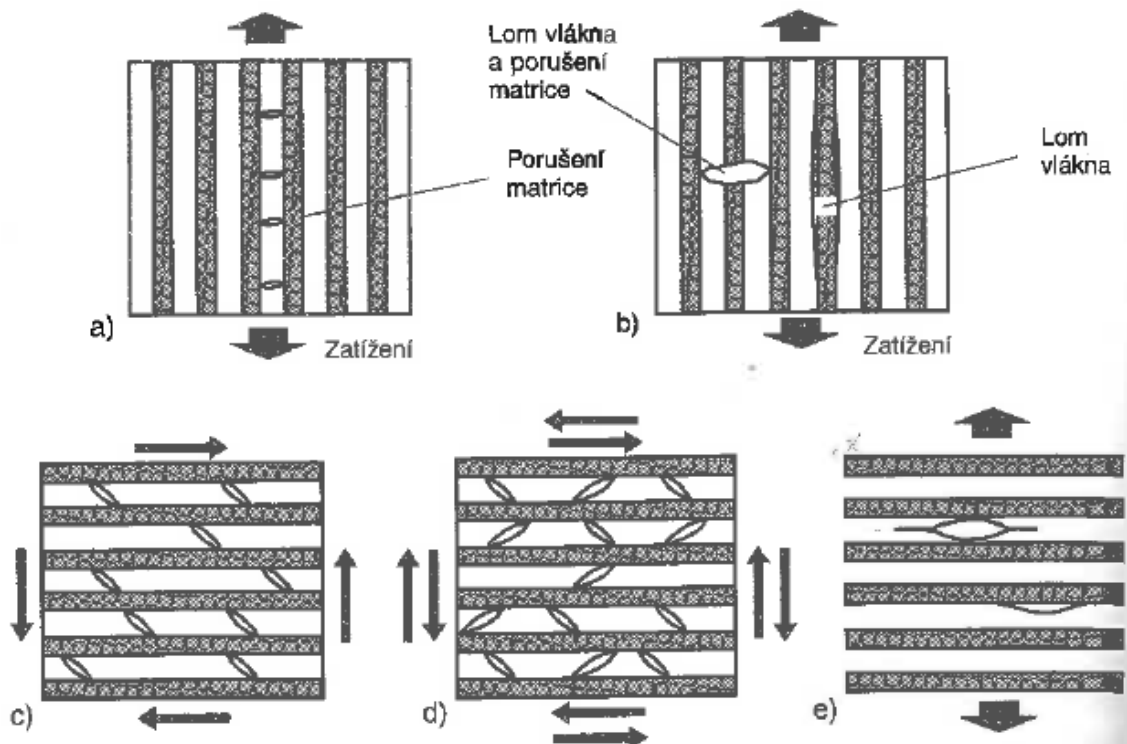
Obecné zásady pro odběr: [16]

- reprezentace dávky, výroby apod.
- vyhnout se místům s vadami
- vzorek musí prodělat celý výrobní proces
- odběrem se nesmí ovlivnit vlastnosti

- brát ohled na anizotropii
- označení (nepoškozovat zkušební část, musí být bez poškození)

3.1 Mechanismus poruch

Pro kompozitní materiály, které jsou zatěžovány víceosým namáháním, existuje větší nebezpečí vzniku mezi vláknového poškození než u vrstev, které jsou vyztuženy jednosměrně při namáhání ve směru orientace vláken. Podle druhu namáhání lze očekávat vznik různých trhlin a vad. [1]



Obr. 14 Vznik prasklin v matrici - mikrostruktura jednosměrně vyztužené vrstvy kompozitu [1]

- zátížení tahem podél vláken-vrbový násobný lom matrice
- zátížení tahem podél vláken - lom vláken
- mezivláknové trhliny pod úhlem 45° - při smykovém zatížení
- mezivláknové trhliny pod úhlem 45° - při střídavém smykovém napětí
- mezivláknové trhliny a odtržení vlákna od matrice v rozhraní při zatížení tahem ve směru kolmo k vláknům

V případě tahu rozlišujeme tyto jednotlivé případy: [1]

- při shodné tažnosti matrice nastává převážně porucha vytvářením trhlin
- při různých tažnostech mohou v závislosti na objemovém podílu vláken vznikat v jedné z obou komponent jak jednotlivé, tak i mnohanásobné trhliny vedoucí k porušení.

Pokud je tažnost matrice vyšší než tažnost vláken, lze její velikost ovlivnit přidáním plniv. Při rázovém namáhání může docházet k delaminaci. Delaminace jsou největší ve spodních vrstvách. Ze spodní strany zkušebního vzorku k horní se rozložení delaminace snižuje. [1]

3.2 Statické zatížení kompozitního materiálu

Jednotlivé pevnostní charakteristiky vykazují výraznější anizotropii než elastické, protože pevnosti nezávisí jen na vlastnostech jednotlivých složek, ale ve větší míře na jejich vzájemné adhezi (přilnavosti). Zatímco jsou elastické charakteristiky dle norem měřeny většinou při nízkých zatíženích, u kterých vlivy struktury (malá adheze, zbytkové napětí, bubliny) nehrají roli, projeví se tyto vlivy při vysokých zatíženích u pevnostních zkoušek, což vede k velkým rozptylům naměřených hodnot. [1]

Při víceosé napjatosti nelze z těchto důvodů odvodit žádné srovnávací napětí jako u materiálů, které jsou izotropní. Hypotézy porušení pro vyztužené plasty musí zohlednit různé typy porušení v různých směrech zatížení. Tedy i vícevrstvý charakter kompozitu (vzájemnou pevnost vrstev mezi sebou). [1]

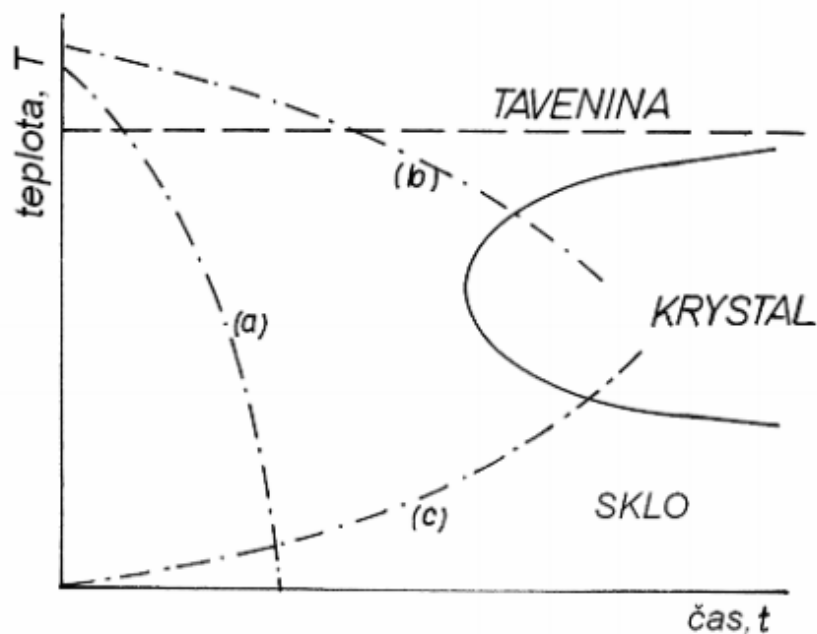
V případě kompozitních materiálů ovlivňuje jejich vlastnosti mnoho faktorů. Naopak je tomu bývá u homogenních polymerů.

3.3 Teplota skelného přechodu T_g

Pro amorfní polymery je to charakteristická veličina. Pod touto teplotou jsou polymery sklovité a tvrdé. V opačném případě nad teplotou T_g jsou polymery elastické, kaučukovité a kapalné. Hodnotu T_g ovlivňuje ohebnost řetězců a jejich mezimolekulární soudržnost.

- $T_g > 20\text{ °C}$ tvrdá plastická hmota
- $T_g < 20\text{ °C}$ kaučuk, vratné deformace, tažnost
- T_g přibližně 20 °C nátěrové hmoty, lepidla

Ke skelnému přechodu dochází ve všech nekystalických a polokystalických materiálech. Do značné míry závisí na chemické a fyzikální struktuře, takže jej lze využít. Skelný přechod způsobuje výrazné změny vlastností materiálu. Je transformací, které odpovídá na ose teploty určitý časový interval. Jeho pomyslný střed se označuje jako T_g – teplota skelného přechodu. Hodnota T_g není konstanta, protože závisí na rychlosti chlazení kapaliny. V praxi je užitečné definovat skelný přechod pomocí viskozity. Přechod mezi taveninou, sklem a krystalickou fází lze znázornit na TTT diagramu. Tento diagram se skládá ze tří veličin a to Time-Temperature-Transformation. [17]



Obr. 15 T-T-T diagram [17]

Graf sestrojený na základě teplot skelného přechodu (T_g) ukazuje, že dochází k vzestupu (T_g) v závislosti na stupni vytvrzení. Teplota skelného přechodu je u amorfních polymerů mírou pohyblivosti segmentů a reaguje na konec vytvrzování podstatně citlivěji než metody, které měří reakční teplo nebo zbytková množství reakčních složek. [1] [18]

Teplota skelného přechodu se může určit bez problémů i v komplexních systémech. Výjimkou jsou systémy s vysokým obsahem vody nebo dodatečně reagujících složek. Proto představuje stanovení teploty skelného přechodu jednu z nejcitlivějších a nevhodnějších metod pro charakterizaci stavu vytvrzení pryskyřičných materiálů. [1] [18]

3.4 Provedené mechanické zkoušky

V experimentální části této práce jsou zkušební vzorky testovány statickou zkouškou na 3 – bodový ohyb, interlaminární pevnost (ILSS), dynamickými zkouškami rázová houževnatost Charpy, rázová zkouška pádem - Padostroj. Proto se zaměříme nejdříve na tyto zkoušky a ostatním zkouškám nebudeme věnovat.

3.4.1 Mechanické zkoušky za teplot odlišných od okolí

Všechny dílce jsou při svém provozu vystaveny teplotám, které jsou odlišné od teploty okolí. Z tohoto důvodu musíme ověřit, do jaké míry teplota ovlivňuje mechanické vlastnosti. Za tímto účelem jsou prováděny zkoušky mechanických vlastností za zvýšených či snížených teplot. [19]

Zkoušky mechanických vlastností za zvýšených teplot [19]

Pro technologii a konstrukci je třeba znát, jaké vlastnosti má zkoušený materiál za vyšších než obvyklých teplot. Zkoušky mechanických vlastností za zvýšených teplot jsou dvojího druhu.

- krátkodobé, při kterých se zpravidla zjišťují vlastnosti materiálu za účelem posouzení jeho vhodnosti k technologickým operacím
- dlouhodobé, při kterých se zjišťují vlastnosti materiálu za účelem posouzení jeho vhodnosti k použití do zařízení pracujících při zvýšených teplotách

Zkoušky mechanických vlastností za snížených teplot [19]

Metodika zkoušek je shodná s postupy, které se provádí za běžných teplot. Zkušební stroj je doplněn o chladicí zařízení. Toto zařízení musí umožnit rovnoměrné ochlazení zkušebního vzorku na předepsanou teplotu a udržení této teploty během zkoušky.

Standartní chladicí prostředí [19]

- směs tuhého kysličníku uhličitého a metylalkoholu (do – 70 °C)
- směs kapalného dusíku a petrolétheru (do – 150 °C)
- kapalný dusík (do – 190 °C)
- kapalné helium (pod – 190 °C).

4 TECHNOLOGIE PULTRUZE

Výroba kompozitu pomocí technologie pultruze pochází z padesátých let minulého století. Evropská produkce pultruzních profilů se odhaduje na 16 000 t/rok. Tato technologie má dva postupy. Jedná se o technologii s otevřeným nebo uzavřeným výrobním postupem. [2]

4.1 PULTRUZE

Slovo „pultruze“ vzniklo z anglického názvu „pultrusion“ a v této české podobě se již mezi odbornou veřejností zažilo. Pultruze je proces kontinuální výroby vyztužených pryskyřic různých tvarů a délky tažením. Vstupní materiál je směs tekuté pryskyřice a vláknové výztuže. Proces zahrnuje tažení materiálu přes vyhřívanou ocelovou formu pomocí tažného zařízení. [20] [39]

Vyztužující materiál, převážně skelné vlákno, je ve formě rovingu a plošných rohoží. Tato vlákna navinutá na cívkách vstupují do srovnávače, jehož funkcí je rovnoměrné rozmístění rovingu v průřezu a správné umístění rohoží. V dalším zařízení se vlákna, rohože a rouška smáčí ve směsi pryskyřice, plniva, barviva, katalyzátoru, popř. dalších přísad pro zlepšení materiálových vlastností výsledného profilu. [20]

Po výstupu z lázně má polotovar už podobný tvar jako výsledný profil. V před tvarovací formě se vytlačuje přebytečné pojivo, profil se postupně tvaruje a vstupuje do vytvrzovací formy. V této vyhřívané formě probíhá termosetická reakce a profil se vytvrzuje.

Na výstupu z formy je hotový profil tažen podávacím zařízením a dělen na požadované délky, většinou šestimetrové. [20]

Tato technologie není zatím mezi výrobci mnoho rozšířená. Hlavní důvod je náročnost výroby a potřeba kvalifikovaných pracovníků. Patří ovšem mezi nejperspektivnější výrobní technologie, které produkují kompozitní materiály. Technologie pultruze je kontinuální proces. Princip technologie spočívá ve vedení vysocepevnostních vláken (výztuž), která jsou smáčena v matrici. Rovingy jsou navinuty na cívkách a vstupují do naváděcích, které zajistí rovnoměrné rozmístění rovingů. Tyto smáčené rovingy jsou poté vedena do vyhřívané vytvrzovací formy, kde dochází k zafixování tvaru při konstantní teplotě. Teplota formy hraje velice důležitou roli. Teplota nesmí kolísat. Nejčastěji využívanou matricí je

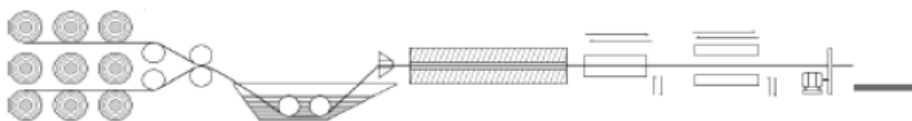
reaktoplastová, přesněji jsou to UP pryskyřice. Po zafixování tvaru se hotový profil nařeže na požadované délky. [10] [21] [22]

Tato metoda nám zaručuje konstantní kvalitu. Výrobky vyrobené touto technologií mají větší obsah výztuže než běžné kompozity. Vyrobené kompozity mohou mít až přes 80 hm. % výztuže. Mají vynikající mechanické vlastnosti, nízkou tepelnou vodivost, nízkou hmotnost, vysokou korozní odolnost, vysokou rozměrovou stálost, elektrickou nevodivost a teplotní roztažnost srovnatelnou s kovy. Mezi další výhody patří nízká navlhavost, takřka neomezená velikost výsledného profilu, různost profilů i nízké náklady. [21] [22]

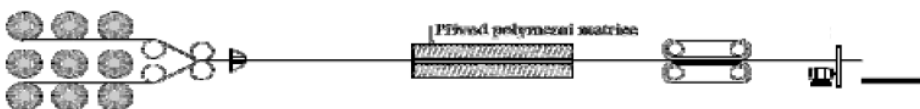
Způsoby výroby pultruze

Existují dva hlavní způsoby impregnace výztuže pryskyřicí. První způsob je smáčení výztuže v pryskyřici s otevřenou lázní. Tento způsob je o hodně jednodušší a rozsáhle používán. Druhým způsobem je dávkování pryskyřice z uzavřené tlakové láhve a smáčení výztuže přímo ve formě. U technologie s otevřenou lázní se vlákna vedou přes ponořovací válce do vany, kde se prosycují a dále pokračují do vyhřáté formy. Při použití technologie s uzavřeným postupem (vstřikováním) dochází k tažení výztuže do formy, do které se následně vstříkne pryskyřice. Ve formě se profil prohřeje a dojde k vytvrzení. Tento postup je vhodný pro velkoobjemovou výrobu. Dosáhne se většího objemu vláken, lepší impregnace a snižují se styrenové emise. [21]

1)



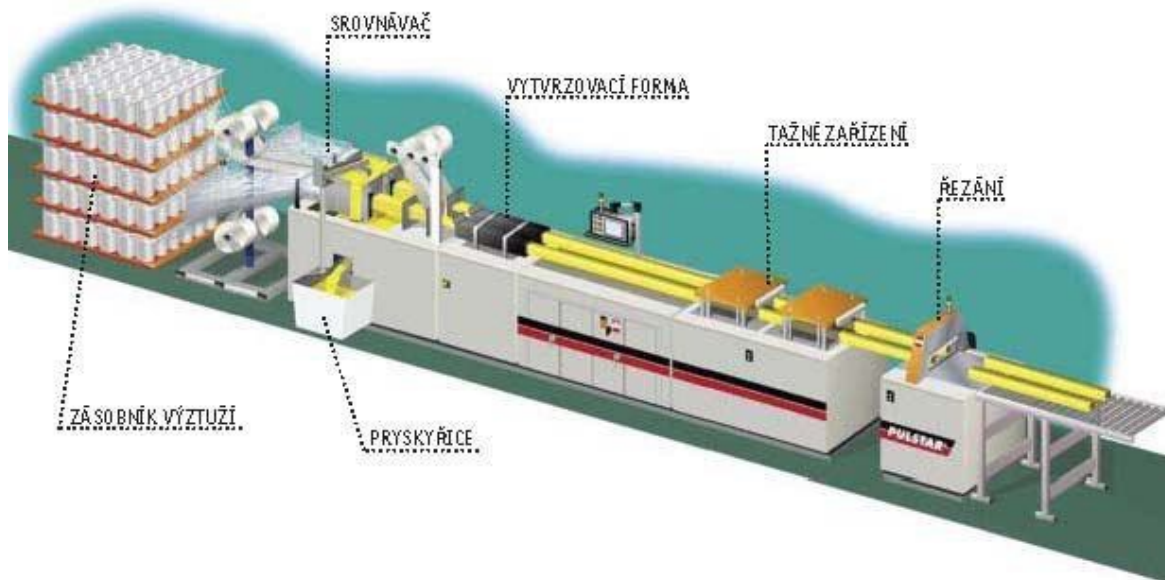
2)



Obr. 16 Schéma pultruzních (tažných linek) s otevřenou lázní 2) s přímým přívodem pryskyřice [21]

4.2 Technologický postup výroby

Hlavní sekce pultruzní (tažné) linky jsou zásobník výztuží, naváděcí desky, sekce se smáčením v pryskyřici, forma, sekce odtahů a dělicí zařízení. [2] [10] [16] [21]



Obr. 17 Pultruzní linka [20]

1. Zásobník výztuží

Ve většině případů se jedná o konstrukci, na níž jsou připraveny cívky s vlákny (rovingy), které jsou ustaveny tak, aby se mohly pohybovat a kontinuálně zásobovat celou výrobní linku. Velice důležité je také samotné uspořádání jednotlivých pramenců a cívek k dosažení maximálních požadovaných výsledků. Cívky jsou ve stojanu vertikálně a vlákno se odvíjí středem cívky, nebo je cívka umístěna horizontálně. Pro tažení klasických profilů je počet cívek v rozmezí mezi 10 až 100. [2] [10] [16]

2. Naváděcí zařízení

Naváděcí zařízení je většinou ve formě děrovaných a drážkovaných desek, které jsou ustaveny kolmo ke směru tažení. Skládá se ze soustavy jednotlivých děr a štěrbin. Samotné otvory nesmějí mít po obrobení ostré hrany, případně musejí být obloženy, aby nedocházelo

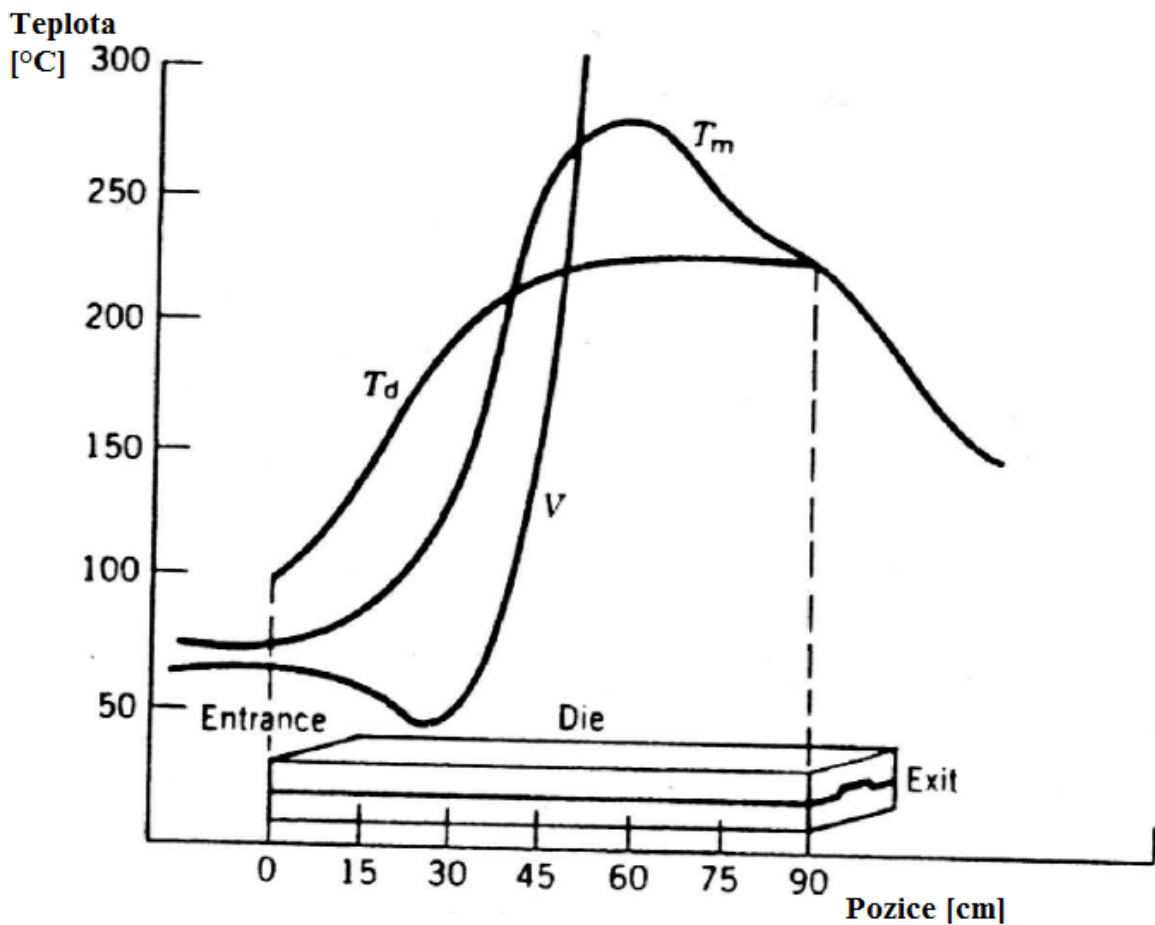
k porušení vláken a tím ke zhoršení vlastností profilu a následnému zatření linky. Hlavní funkcí je správné uspořádání rovingů před vstupem do impregnační oblasti. [2] [10] [16]

3. 4. Proces smáčení

Smáčecí oblast je tvořena vanou, ve které je napuštěna matrice (pryskyřice). Jednotlivé vlákna (rovingy) nebo jiné vyztužující prvky jsou přes naváděcí desky a válce vedena do pryskyřičné smáčecí (vany). Tady se vlákna dokonale smáčí v pryskyřici, kde dochází k prosycení a jsou vedena k stírací desce, kde se setře přebytečná pryskyřice. Poté jednotlivá vlákna putují do pultruzní formy. Samotné způsoby smáčení jsou různé. Můžeme použít také prosycování s přímým přívodem do pultruzní hlavy. Nedokonalé smáčení vede ke zhoršení mechanických vlastností kompozitu. [2] [10] [16]

5. Pultruzní forma

Materiál je do pultruzní hlavy přiváděn pomocí tažných sil. Tyto síly působí od tažného zařízení. Tato síla je značně vysoká, protože musí překonat odpor, který vzniká v důsledku tlaku při průběhu vytvrzování a změny objemu pryskyřice. Tlak není konstantní po celé délce hlavy. Podobně je tomu také u rozdělení teplot, kde se používá přehřev. Pultruzní hlava bývá konstruována na 1-4 teplotní zóny. Pro sledování přesné teploty hlavy bývá nainstalováno přídavné zařízení s termočlánky pro kontrolu a udržování konstantní teploty. Pultruzní forma bývá převážně ze dvou dílů s chromovaným leštěným povrchem. [2] [10] [28]



Obr. 18 Rozdělení teplot formy T_d , vytvrzované směsi T_m , tlaku p , viskozity V po délce pultruzní formy [22]

6. Tažná sekce a řezání materiálu

Odtah materiálu je umístěn za formou. Jejím úkolem je mechanicky odtahovat již vytvrzený profil, který vyjíždí konstantní rychlostí z formy. Tím, že se hotový profil odtahuje, automaticky vtahuje do formy další prosycenou výztuž. Tažné zařízení bývá umístěno na dvou místech. První bývá za vytvrzovací formou a druhé před dělicí částí. [2] [10] [16]

Poslední sekci pultruzní linky je pohyblivá pila s diamantovým kotoučem. Pila slouží k dělení materiálu na požadované délky. U menších linek není tato pila plně automatická a dělení se provádí pomocí ručních elektrických kotoučových pil. U velkoobjemové výroby bývá výhodnější použití pohyblivé automatické pily, která má schopnost se při řezání pohybovat souběžně s posunujícím se profilem. [2] [16]



Obr. 19 1.) Zásobník výztuží, 2.) Naváděcí zařízení, 3.a 4.) Proces smáčení, 6.) Tažná sekce a řezání materiálu [20]

4.2.1 Ostatní technologie výroby pultruze

Pulforming:

- Pultruze (tažení) lze použít i pro výrobu tvarově náročných profilů
- Jde o kombinaci pultruze a BMC (Bulk Molding Compaund) technologie
- Tažený profil je pomocí ohřevu mikrovlnných vln zahřátý, vložen polotovar BMC a profil je dotvarován a vytvrzen

PDM (tažení):

- PDM tažení PDM (Post Die Manipulation Pultrusion)
- Umožňuje říditelný proces proměnného zakřivení profilu
- Vlastní vytvrzení profilu nastává UV zářením za tvarovací částí

Pullwinding:

- Je to kontinuální technologický proces, který se kombinuje s ovíjením a tažením
- Výhodou je lepší kombinace podélné a příčné pevnosti [2] [14]

4.3 Využití technologie výroby pultruze

Mezi předem definované vlastnosti výrobků vyrobených touto technologií patří především:

- vynikající mechanické vlastnosti
- nízká hmotnost
- obsah výztuže několikanásobně větší než u běžných kompozitů
- odolnost proti korozi
- nízká tepelná vodivost
- teplotní roztažnost srovnatelná s kovy
- rozměrová stálost
- elektricky nevodivé
- nízká navlhavost
- téměř neomezená délka (kontinuální technologie)
- nízké výrobní náklady

Kvalita těchto výrobků je značně vysoká, mnohokrát převyšuje kompozity ručně skládané nebo za studena tvarované. V poslední době se využívá také tato technologie s využitím vstřikování, kdy lze vyrábět i sendvičové panely nebo prepregy. [2] [16] [23]

Tyto tažené profily mají vynikající vlastnosti ve směru vláken (rovingů). Podstatně horší vlastnosti má materiál ve směru napříč vlákny, ale to už vyplývá z jejich struktury. Pultruzní profily se osvědčily jako výborný technický materiál, který má zastoupení v mnoha různých průmyslových odvětvích, jako například: [23]

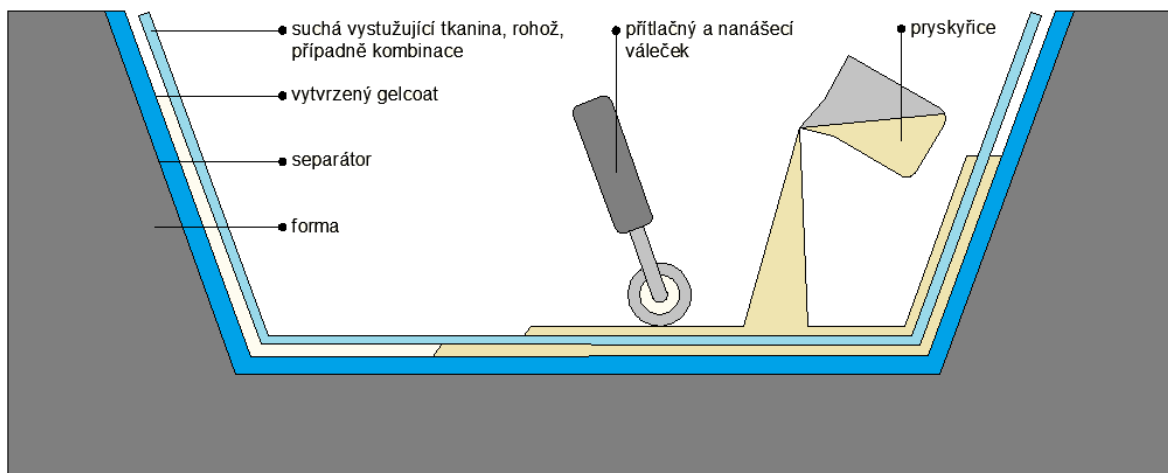
- elektrotechnika
- chemický průmysl
- stavební průmysl
- letecký průmysl
- dopravní průmysl
- sportovní průmysl

Využití kompozitních materiálů je v současné době hodně prosazováno. Tyto materiály můžeme objevit v podstatě kdekoli v průmyslu. Do budoucna můžeme počítat s ještě progresivnějším zastoupením těchto materiálů. S tím souvisí i posun ve vývoji technologií, který se nebude vyhýbat ani technologii pultruze. [16] [23]

4.4 Další popis zpracovatelských technologií vhodných pro výrobu kompozitních materiálů

4.4.1 Ruční laminace za mokra

Ručním kladením výztuže na otevřenou formu lze vyrobit i velmi vysoce rozměrné výrobky. Výztuž musí být v podobě tkaniny nebo rohože, pryskyřice při předem definované teplotě musí být tekoucí. Prosycení výztuže tekutou pryskyřicí je prováděno ručním způsobem pomocí potřebných pomůcek (štětec, stěrka, váleček). Kvalita je o zručnosti a zkušenosti člověka. [24]



Obr. 20 Ruční laminace válečkem za mokra [25]

4.4.2 Technologie RTM (Resin Transfer Molding)

Označovaná jako injekční vstřikování je jednou z technologií zabývajících se výrobou kompozitních materiálů. Tato technologie je určena pro složité a přesné výrobky ve vyšších sériích. RTM se zabývá výrobou kompozitů složených z pryskyřicové matrice a soustavy vláken, kde vlákna mohou být rozličně uspořádána. RTM lze rozdělit na dvě fáze. RTM technologie je nástupce ruční laminace. V první fázi se vyrobí vláknový předlisek. V druhé

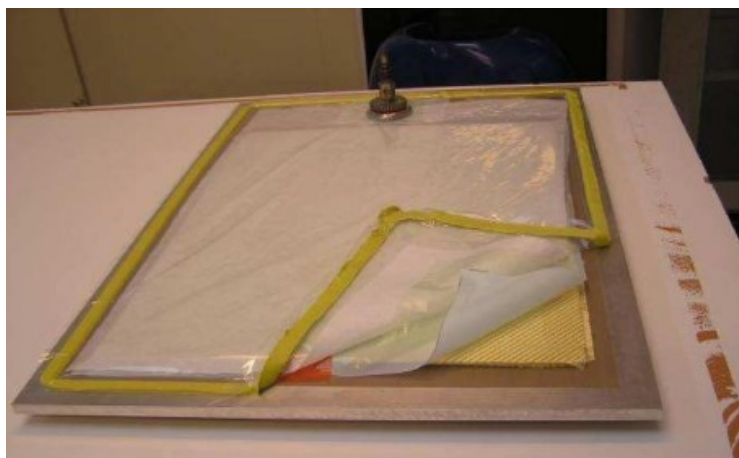
fázi dojde k zastříknutí předlisku pryskyřicí, jež se umístil do formy. Tvarový předlisek vzniká buď přímo pomocí některé textilní technologie nebo je vyroben tvarováním rovinného textilního přístřihu. [24]



Obr. 21 Kryt strojových komponentů u autobusů [24]

4.4.3 Laminace pod fólií (plachetkou)

Tato technologie se v základních rysech podobá RTM technologii s tím rozdílem, že horní díl formy je nahrazen fólií (skořepinou). Tato metoda je určena pro pevnostní a velkorozměrové výrobky (o rozměru až 20 m²), které musí splňovat přísnější pevnostní kritéria. Taktéž se využívá na výrobu kompozitních sendvičových konstrukcí pro lepší konsolidaci jednotlivých vrstev. Další výhodou je kvalitnější rubová strana výrobku a vyšší produktivita ve srovnání s ruční laminací. [24]



Obr. 22 Technologie výroby pod fólií (plachetkou)

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je studium kompozitních materiálů pro kolejová vozidla vyrobených pomocí technologie pultruze. Následně byly testovány jejich mechanické vlastnosti, kde jsme se zaměřili na porovnání zkušebních vzorků s jednotlivými matricemi (Polyesterová, akrylátová, polyuretanová) se stejným procentuálním zastoupením výztuže.

Zkušební vzorky byly testovány především na 3 - bodový ohyb, interlaminární smyková pevnost - ILSS, zkoušku rázové houževnatosti – Charpy, rázová zkouška pádem – Padostroj dle příslušných norem ČSN EN ISO 178 – Plasty – Stanovení ohybových vlastností, ASTM D 2344 - Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, ČSN EN ISO 179 – Plasty – Stanovení rázové houževnatosti Charpy – Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška, ČSN EN ISO 6603 - Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání - Metoda padajícího tlouku.

Cíle diplomové práce jsou:

1. Materiálové složení pultruzních profilů s různými typy pryskyřic s různou teplotu T_g .
2. Příprava zkušebních těles dle norem
3. Experimentální testování vzorků dle zvolených zkoušek
4. Vyhodnocení získaných výsledků a jejich porovnání
5. Diskuse dosažených výsledků a definice závěru

6 TECHNOLOGIE PULTRUZE A PRINCIP VÝROBY TESTOVANÝCH VZORKŮ

Výroba kompozitních materiálů pomocí technologie pultruze a její technická specifikace je uvedena již v teoretické části této diplomové práce. Převážně díky podrobným informacím uvedených v teoretické části jsou zde představeny pouze hlavní informace o této technologii, které jsou zaměřeny pro železniční vozidla, autobusy, letectví a ostatní průmysl.

Mezi největší výhody této technologie patří vysoká produktivita práce, vysoký stupeň automatizace a s tím spojené minimální náklady na zaměstnance obsluhy výrobní linky. Na výstupu z výrobní linky vyjíždí hotový profil daný tvarem z formy o nekonečné délce. Proměnlivost vyráběných profilů je v podstatě nekonečná. Výsledný profil má vysokou kvalitu a požadované vlastnosti, které jiné materiály nemůžou zaručit. Největší požadované vlastnosti jsou nízká hmotnost, pružnost, vysoká pevnost. K dalším požadovaným vlastnostem patří nízké opotřebení, vysoká měrná pevnost a tuhost vůči poměru hmotnosti, dlouhá životnost, tlumení rázů, vibrací a vzhledem k hmotnosti snadná manipulace.

Nevýhody:

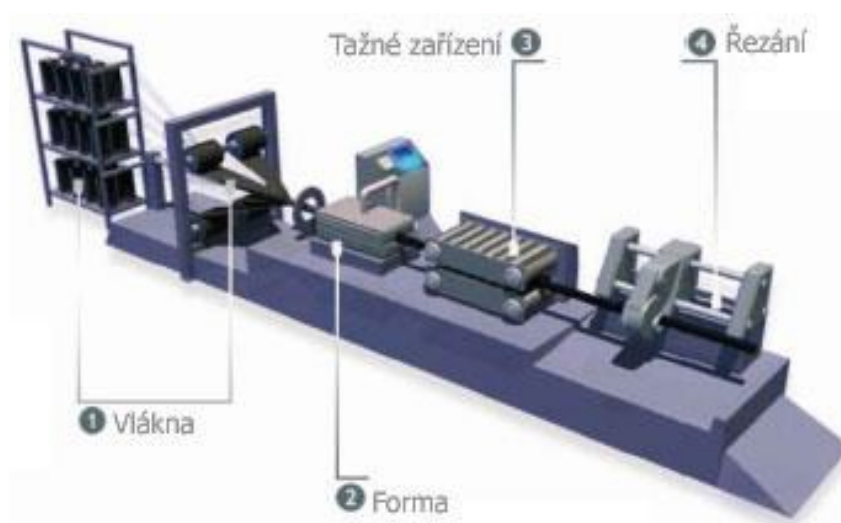
- drahý provoz linky
- vysoká cena vstupních surovin a materiálů
- vysoké investiční náklady na pořízení požadovaných technologií a jejich výrobu
- linka pro výrobu jednotlivých profilů potřebuje kvalitní a náročný řídicí systém [16] [26] [27]

V dalších kapitolách se ve své práci věnuji principu technologii tažení (pultruze), která je realizována ve firmě 5M.

6.1 Princip výroby pultruzních profilů firmou 5M s.r.o.

Výroba pultruzních profilů spočívá v použití předem jasně daných technologických postupů výroby. První technologie výroby je technologický postup s otevřenou lázní, který je nejvíce používaný a technologicky není tak náročný. Druhou technologií výroby je technologický postup s uzavřenou tlakovou impregnací. Tato technologie je víceméně podobná technologii vstřikování.

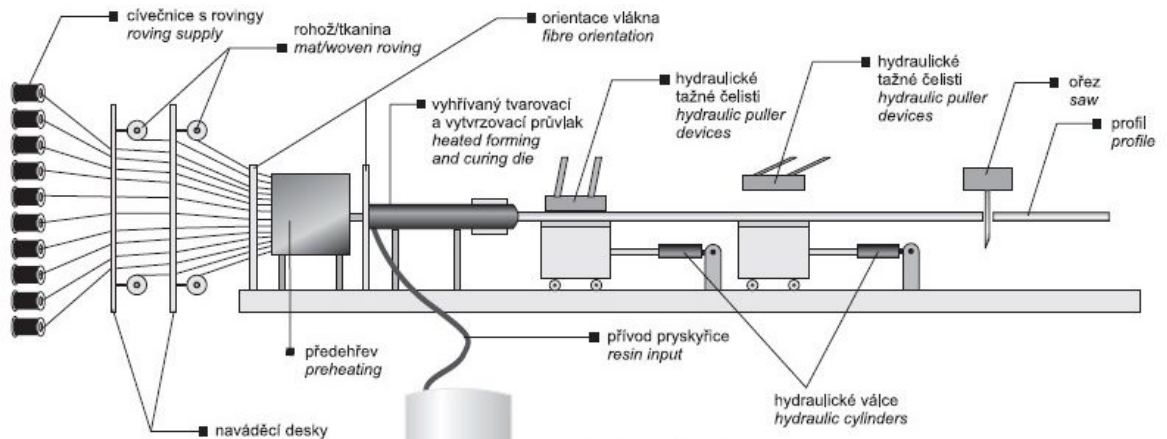
Vzorky, které byly použity pro experimentální část diplomové práce, jsou vyrobeny technologií pultruze s otevřenou lázní. Vyztužující vlákna, která jsou navíjena do rolí, jsou uložena v zásobníku a odtud jsou přes rovnací hřebeny a naváděcí desky naváděny do lázně s pryskyřicí. Hřebeny jsou velice pro výrobu důležité. Musí jednotlivé rovingy přesně nasměrovat a navést do pryskyřičné lázně. Pokud by neproběhlo přesné rozmístění vláken při najíždění do formy, tak by došlo k nesprávnému uložení skladby a utrpěla by tím kvalita výrobku a mohlo by dojít ve finále až k případnému zatržení výrobku ve formě. Po důkladném prosycení vláken se přebytečná pryskyřice setře stírací deskou. Vlákna, která vstupují do lázně, nesmí být nijak znečištěna, jinak by došlo by k nedokonalému prosycení. Následně jsou vlákna vedena do vytvrzovací formy, která musí mít přesnou teplotu. Teplota vytvrzovací formy je nejdůležitější pro výsledný výrobek. Teplota nesmí kolísat a je pro každý typ materiálu přesně definována. Po vytvrzení a zformování vychází z formy hotový profil, který je pak dále řezán na požadované délky. [26]



Obr. 23 Schéma pultruzní (tažné) linky – 1.) Vlákna (rovingy), 2.) Forma, 3.) Forma, 4.) Řezání [26]

6.2 Pultruzní výrobní linka firmy 5M s.r.o.

Společnost 5M s.r.o. má k dispozici několik pultruzních linek, které mají totožnou konstrukci a všechny linky mají otevřenou lázeň s pryskyřicí.



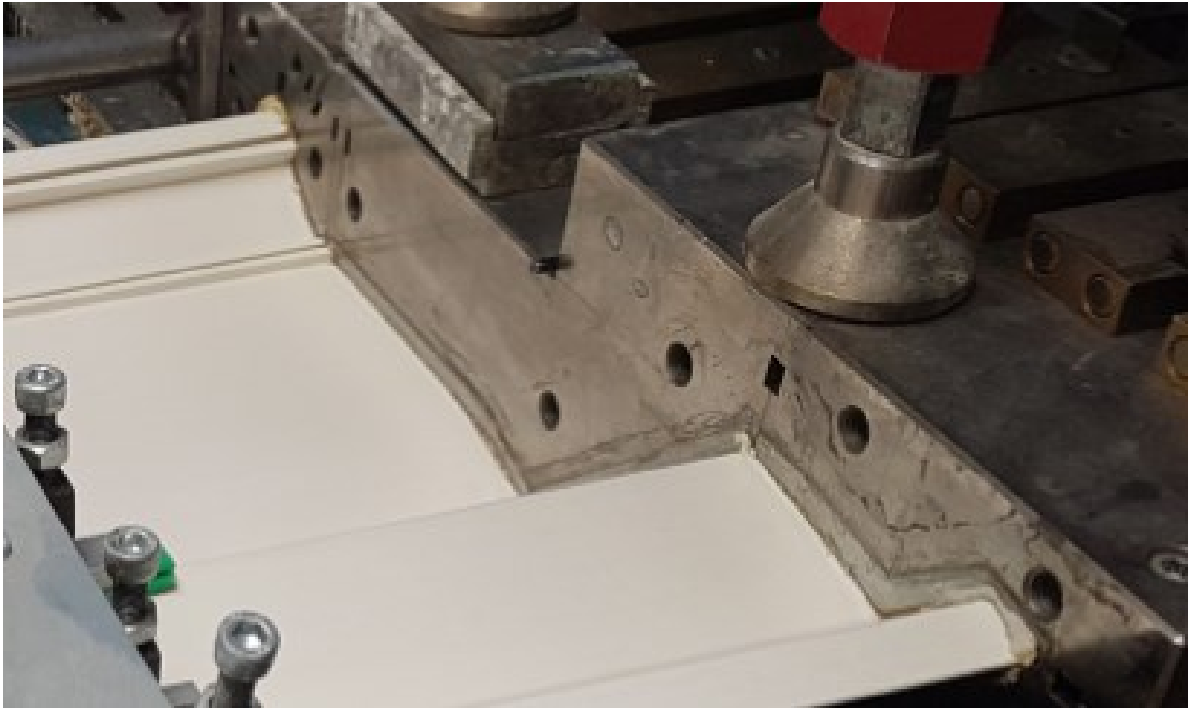
Obr. 24 Výrobní linka [28]

Proces výroby spočívá v prvním kroku, kterým je ustavení výztužného materiálu do jednotlivých stojanů. Stojan je složen z šesti pater a v něm jsou vloženy role s materiálem. Počet rolí je závislý na požadavku na výrobek od zákazníka a jeho procentuálního složení.



Obr. 25 Výrobní linka (umístění a navádění rohoží, rovingů) [29]

Jednotlivé pramence rovingů a rohože jsou nataženy do srovnávacích hřebenů. Prameny rovingů se nesmí nikde zamotat a musí být pozicovány přesně dle technologické postupu. Jejich vedení a tažení z rolí musí být umístěno přesně, v nesprávném případě by výrobek nebyl dostatečně zaplněn výztuží a utrpěla by tím kvalita finálního výrobku. Po ustavení těchto pramenů jsou přesně vloženy vedle sebe a vedeny do vany, kde probíhá proces sycení. Musí vždy dojít k dokonalému prosycení. Pokud neproběhne přesný technologický proces, z vytvrzovací formy vystupuje materiál, na kterém vznikají neprosycená místa s důsledkem, že určitá část materiálu má značně nekvalitní mechanické vlastnosti a jeho pevnost se rovná zhruba jen pevnosti vyztužujícího materiálu. Do vany s pryskyřicí se nesmí dostat žádné nečistoty. Pokud dojde k znečištění pryskyřice, bude výsledek jednoznačně podobný jako ve fázi nedostatečného prosycení. Prosycené prameny s rohožemi pak vstupují do vyhřívané formy, kde probíhá proces vytvrzení, jímž je výrobku dán finální tvar.



Obr. 26 Výrobní linka (výstup z formy a tvar finálního výrobku)

Důležitým faktorem je teplota uvnitř formy. Pokud bude ve formě nastavená nízká teplota, není materiál dostatečně připraven k odtahu z formy, a naopak při vysoké teplotě dochází k přepalování materiálu. Nejchoulostivější místo kompletní výroby je stanovit co nejpřesněji teplotu formy, která musí stabilní po celkové ploše formy. Je nutné využít co nejvíce zkušeností operátorů a nastavit co nejpřesnější přesné teploty pro jednotlivé materiály.

7 POPIS PROVEDENÝCH ZKOUŠEK

Pro přípravu zkušebních těles a následné testování byly využity normy. Jedná se především o normy pro stanovení zkoušky 3 - bodového ohybu, interlaminární smykové pevnosti - ILSS, rázové zkoušky houževnatosti Charpy a rázové zkoušky pádem - Padostroj.

7.1 ČSN EN ISO 178 - Plasty - Stanovení ohybových vlastností

Norma uvádí metodu pro stanovení ohybových vlastností tuhých plastů a polotuhých plastů za definovaných podmínek. Je definováno standardní zkušební těleso, ale tam, kde je to vhodné, lze rozměry zkušebních těles volit. Je uvedena řada hodnot zkušebních rychlostí. Metoda se používá ke zjišťování chování zkušebních těles při namáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Podstatou zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přítláčným trnem uprostřed jejich rozpětí (3 - bodový ohyb). [30]

Metoda je vhodná pro následující materiály: [30]

- Termoplasty pro tváření, vytlačování a odlévání, plněné a vyztužené
- Desky z tuhých termoplastů
- Reaktoplasty pro tváření, plněné a vyztužené
- Desky z reaktoplastů

Podpěry a zatěžují trn:

Poloměr podpěr R1 a poloměr trnu R2:

$$R1 = 2 \pm 0,1 \text{ mm}$$

$$R2 = 5 \pm 0,1 \text{ mm-platné pro tloušťky vzorků} \leq 3 \text{ mm}$$

Rozměry tělesa:

$$\text{Délka } l = 80 \pm 2 \text{ mm}$$

$$\text{Šířka } b = 10 \pm 0,2 \text{ mm}$$

$$\text{Tloušťka } h = 3 \pm 0,2 \text{ mm}$$

Rozpětí podpěr L:

- Rozpětí nastaveno na 48 mm dle normy

Rychlost zkoušky:

- Nastavení probíhá dle požadavků v dané normě u zkoušeného materiálu.
- Pokud není k dispozici, tak se vybere hodnota, která je co nejbližší rychlosti deformace 1 % za minutu.
- Jedná se o rychlost zkoušky, která v daném časovém intervalu 1 minuty způsobí průhyb tělesa, který je co nejbližší 0,4 násobku jeho tloušťky (tzn. 4 mm/min pro výchozí těleso).

7.2 ASTM D 2344 - Zkouška ILSS (Interlaminar Shear Strength) – Interlaminární smyková pevnost

Podstata zkoušky:

- Zkouška dává informace o kvalitě spojení mezi vlákny a pryskyřicí.
- Jde o zatěžování vzorku ohybem na dvou podpěrách, kde zatížení je aplikováno uprostřed délky zkušebního tělesa, v polovině rozpětí mezi podporami.
- Tato metoda není limitována rozměry zkušebního tělesa, ale je omezena předepsaným poměrem vzdálenosti podpěr a délky zkušebního tělesa k tloušťce zkušebního tělesa.

Zkušební zařízení:

- Mikrometr s přesností měření na 0,01 mm
- Umožňuje zajistit konstantní rychlost zatěžovacího trnu a přesnost měření v rozsahu $\pm 1 \%$, rozpětí podpěr musí být nastavitelné
- Průměr zatěžovacího trnu je 6,35 mm s povrchem o tvrdosti 60 až 62 HRC. [33]

Rozměry tělesa:

Délka $l = 18 \pm 2$ mm

Šířka $b = 6 \pm 0,2$ mm

Tloušťka $h = 3 \pm 0,2$ mm

Rozpětí podpěr L:

- Rozpětí podpěr nastaveno na 12 mm dle normy.

Rychlost zkoušky:

- Nastavení probíhá dle požadavků v dané normě u zkoušeného materiálu
- Pokud není k dispozici, tak se vybere hodnota, která je co nejbližší rychlosti deformace 1 % za minutu
- Jedná se o rychlost zkoušky, která v daném časovém intervalu 1 minuty způsobí průhyb tělesa, který je co nejbližší 0,4 násobku jeho tloušťky (tzn. 1 mm/min pro výchozí těleso).

7.3 ČSN EN ISO 179 - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy

Rázová zkouška: [31]

Rázová houževnatost je vlastně energie spotřebována k porušení zkušebních vzorků. Je vztažena na plochu kritického průřezu zkušebního tělesa za předem stanovených podmínek. Označuje se a_n (kJ/m²).

Popis zkoušky: [31]

- Kyvadlové kladivo s rozsahem podle typu materiálu a rozměru zkušebních těles, bývá opatřeno stupnicí, na které se absorbovaná energie W (spotřebovaná práce) odečítá přímo
- Odečtené hodnoty musejí být umístěny mezi 10 a 80 % celkového rozsahu stupnice

Zkouška rázové houževnatosti spočívá v tom, že padající kyvadlové kladivo udeří na zadní stranu zkušebního tělesa, které přitom určitou kinetickou energií přerazí. V momentě nárazu do vzorku pohltí část kinetické energie kladiva deformační procesy. Množství této energie se liší v závislosti na zkoušeném materiálu a teplotě. Kyvadlo se ještě částečně přehoupne i na druhou stranu. To způsobí energie, kterou při přeražení vzorek nepohlí. Pokud by kladivo padalo po své kruhové dráze, aniž by narazilo do vzorku, dosáhlo by téměř stejné výšky kyvu, z jaké bylo spuštěno. Tímto způsobem se vypočítá nárazová práce/rázová energie W (J) pro daný materiál za určité teploty. [31]

- Rozměry zkušebních vzorků jsou dány dle normy.

7.4 ČSN EN ISO 6603 - Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při vícešém rázovém namáhání - Metoda padajícího tlouku

Padostroje představují alternativní způsob měření rázové houževnatosti polymerních materiálů, když eliminují nedostatky kyvadlových přístrojů (volba energie, rychlost provedené deformace).

Popis stroje:

Padostroje pracují na principu padajícího tělesa na zkušební vzorek s libovolně volitelnou kinetickou energií (závisí na hmotě padající tělesa) a rychlosti (ovlivněna výškou pádu).

Popis:

U zkušebního přístroje musí být zajištěn kolmý dopad tlouku do středu zkoušeného tělesa. Tlouk má leštěnou polokulovou nárazovou plochu o poloměru 10 mm s rozměrovým tolerančním polem $\pm 0,1$ mm. Tlouk je vyroben z materiálu, který je dostatečně odolný proti otěru a má dostatečnou pevnost vůči vzniku plastické deformaci. Vhodným materiálem pro testování polymerů jsou nástrojové oceli, které jsou tepelně popř. chemicko-tepelně zpracovány. Hmotnost padajícího tlouku se závažím činí 23,8 kg. Snímač síly je umístěn do vzdálenosti jednoho poloměru tlouku od nárazové plochy tlouku. Musí být umístěn co nejbližší k nárazové ploše, z důvodu minimalizace externích sil, kromě toho musí být dostatečně blízko, aby byl splněn požadavek na odezvu kmitočtu. Měřicí systém zaznamenává sílu s přesností do 1 % příslušné maximální síly. [32]

- Rozměry zkušebních vzorků jsou dány dle normy.

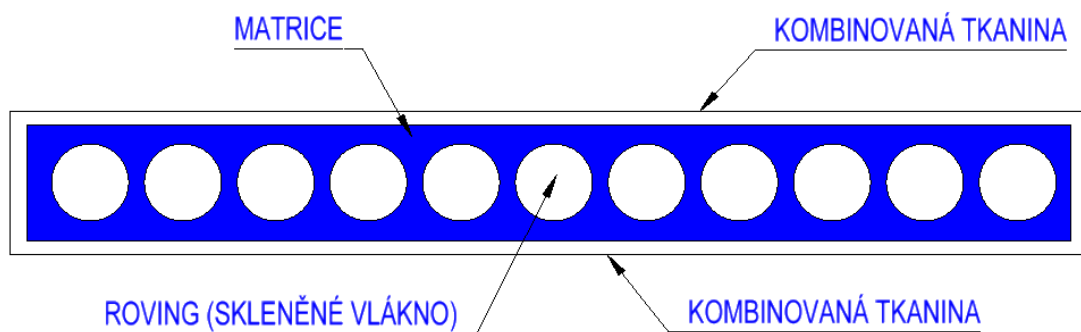
8 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ VZORKŮ

K testování je vymezeno více vzorků od každého typu matrice. Každý ze vzorků je testován, přičemž je testováno 10 kusů, jak uvádí norma dle ČSN o tloušťce 3 mm.

První vzorek se skládá z jednosměrně uložených přímých skelných rovingů a tkaniny. Jako matrice byla zvolena polyesterová pryskyřice PRP 102 směsová. Výztuž u tohoto vzorku obsahuje 78 hm% skelné výztuže.

Druhý vzorek je složen z jednosměrně uložených přímých skelných rovingů a tkaniny. Matrici tvoří akrylátová pryskyřice Letoxit 468. Výztuž obsahuje 78 hm%.

Třetí vzorek je složen z jednosměrně uložených přímých skelných rovingů a tkaniny. Matrici tvoří polyuretanová pryskyřice Letoxit AX 456. Výztuž obsahuje 78 hm%.



Obr. 27 Schéma skladby výrobku

8.1 Příprava zkušebních vzorků

Materiál byl dodán v podobě finálního výrobku, kde jeho rozměry jsou dané formou. Z pultruzních profilů byly připraveny zkušební vzorky na normované rozměry. Příprava spočívala v nařezání testovaných vzorků na formátovací pile s diamantovým kotoučem na příslušné rozměry dle normy. Vzorky byly po nařezání řádně vizuálně zkontrolovány, aby neobsahovaly otřepy, nečistoty, praskliny, vruby apod., které by mohly negativně ovlivnit naměřené výsledky.



Obr. 28 Zkušební materiál ve formě finálního výrobku 1/2



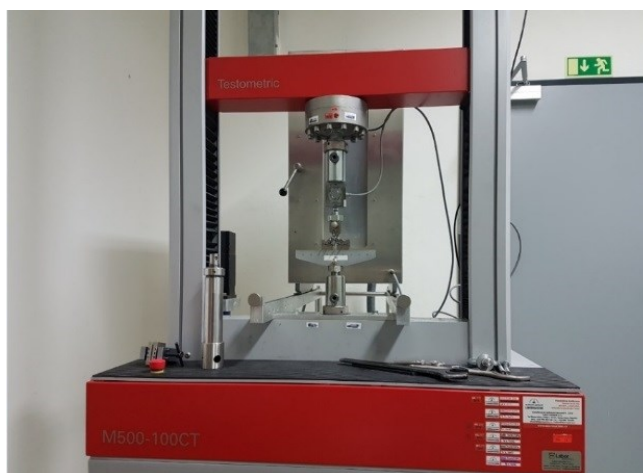
Obr. 29 Zkušební materiál ve formě finálního výrobku 2/2

9 TESTOVACÍ STROJE A JEJICH CHARAKTERISTIKY

Testování zkušebních vzorků na 3 – bodový ohyb a interlaminární smykovou pevnost ILSS bylo provedeno na zkušebním stroji TESTOMETRIC M500-100 CT. Stroj využívá software Wintest Analysis, který pracuje pod operačním systémem Windows. Pomocí tohoto software lze na stroji provádět zkoušky tahové, tlakové, ohybové, cyklické namáhání, adheze, stříh, tvrdost. Snímače síly jsou nastaveny na citlivost do 1,5 kN a do 20 kN. Software umožňuje nastavení jednoduchých zkoušek pro běžné zkoušky materiálu, pro potřeby vývoje nebo výzkumu je zde možnost nastavení víceúrovňového zatěžování. K dispozici je automatické ukládání všech testovacích dat a snadný export do jiných softwarových balíčků, jako je Word, Excel, Access a SPC systémy pro lepší generování sestav. Všechny testované hodnoty a jejich výpočty provádí software automaticky a výsledky zaznamenává do potřebných tabulek a grafů. [34]

Tab. 4 Popis stroje TESTOMETRIC M500-100 CT

Testovací stroj TESTOMETRIC M500-100 CT	
Kapacita stroje	100 kN
Rychlost posuvu	0,001 - 500 mm/min.
Měřicí rozsah	0,4 - 100 % jmenovité hodnoty siloměru
Třída přesnosti siloměru	0,5 dle ISO 7500
Zkoušky	tahové, tlakové, ohybové, cyklické namáhání, adheze, tvrdost
Výška (bez čelistí)	1059 mm
Šířka	420 mm
Teplotní komora	- 80 až + 250 °C



Obr. 30 Testovací stroj TESTOMETRIC M500-100 CT

Pro testování rázové houževnatosti byla použita metoda Charpy, kde bylo zapotřebí použít testovací stroj ZWICK/ROELL HIT 50 P. Na tomto stroji můžeme provádět různá měření, je charakterizován rozměry stroje, do kterých se řadí rozpětí podpor, délka kyvadla, úhel břitu. Do popisu dynamiky stroje spadá energie a rychlost rázu.

Tab. 5 Popis stroje ZWICK/ROELL HIT 50 P

Testovací stroj ZWICK/ROELL HIT 50 P	
Maximální rázová energie	50 J
Dopadová rychlost	2,2 - 3,8 m/s



Obr. 31 Testovací stroj ZWICK/ROELL HIT 50 P

Další zkouškou byla použita metoda rázová zkouška pádem-padostroj, kde bylo zapotřebí použít testovací stroj ZWICK/ROELL HIT 230 F. Na tomto stroji provádíme víceosé rázové zkoušky. Používá se pro stanovení charakteristik materiálu u standardních zkušebních vzorků podle běžných norem v oblasti výzkumu, vývoje a zajištění kvality.

Tab. 6 Popis stroje ZWICK/ROELL HIT 230 F

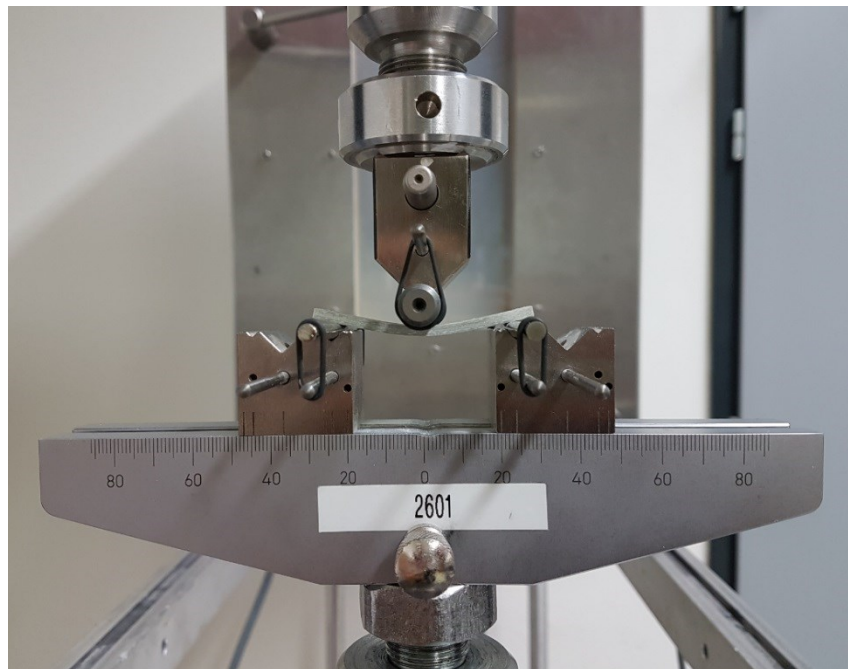
Testovací stroj ZWICK/ROELL HIT 230 F	
Výška pádu	0,11 - 1 [m]
Maximální dopadová rychlost	4,4 [m/s]
Maximální energie	230 [J]
Maximální rychlost záznamu	4 [MHz]



Obr. 32 Testovací stroj ZWICK/ROELL HIT 230 F

10 VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK

Z profilů připravených metodou pultruze (při zachování shodné skladby výztuže a použití různých polymerních matric) byla pro účely provedení zkoušek nařezána zkušební tělesa ve tvaru pásků orientovaných jak ve směru tažení, tak ve směru příčném. Výjimkou jsou zkušební tělesa pro rázovou zkoušku pádem, která měla tvar destiček. Dosažené výsledky jsou uvedeny v tabulkách 7–17.



Obr. 33 Probíhající testování 3 - bodový ohyb

10.1 ČSN EN ISO 178 - Plasty - Stanovení ohybových vlastností

10.1.1 Profil s akrylátovou maticí

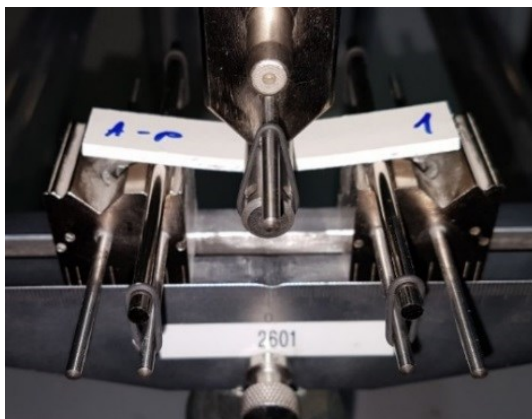
V tabulce 7. je vyhodnocení zkoušky pro vzorky připravené jak v podélném, tak i v příčném směru vůči tažení při pultruzi. Zaznamenanými a dále pak diskutovanými veličinami jsou modul pružnosti v ohybu E_o , maximální ohybová síla F_{max} a mez pevnosti v ohybu σ_{max} . Umístění vzorku ve zkušebním zařízení je při zkoušce 3 - bodovým ohybem znázorněno na obr. 33. Charakteristický typ porušení vzorků při zkoušce je znázorněn na obr. 34 a 35.

Tab. 7 Výsledky zkoušky 3 - bodovým ohybem profilu s akrylátovou maticí se skleněnou výztuží

Akrylát	Napříč			Podél		
	E_o [GPa]	F_{max} [N]	σ_{max} [MPa]	E_o [GPa]	F_{max} [N]	σ_{max} [MPa]
n	10	10	10	10	10	10
Min	7,8	279,0	151,8	8,4	340,0	189,8
\bar{x}	8,2	301,2	165,3	8,7	376,8	210,6
Max	8,6	335,0	185,2	9,3	418,0	234,2
σ	0,3	20,7	12,5	0,4	32,5	18,1
v_x [%]	3,4	6,9	7,6	4,6	8,6	8,6



Obr. 34 Zkušební vzorek s porušením na tahové straně ve směru příčném vůči směru tažení při pultruzi



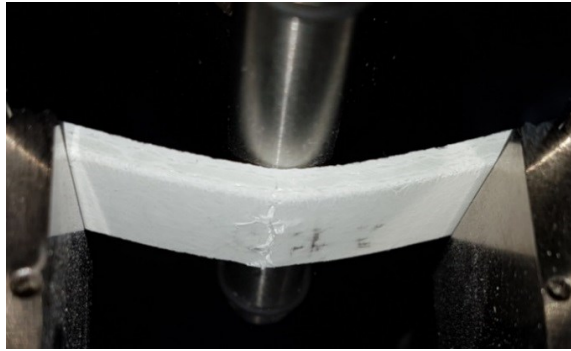
Obr. 35 Zkušební vzorek ve směru podélném vůči směru tažení při pultruzi

10.1.2 Profil s polyesterovou matricí

V tabulce 8 je vyhodnocení zkoušky pro vzorky připravené jak v podélném, tak i v příčném vůči směru tažení při pultruzi. Zaznamenanými a dále pak diskutovanými veličinami jsou modul pružnosti v ohybu E_o , maximální ohybová síla F_{\max} a mez pevnosti v ohybu σ_{\max} . Charakteristický typ porušení vzorků při zkoušce je znázorněn na obr. 36 a 37.

Tab. 8 Výsledky zkoušky 3bodovým ohybem profilu s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží

Polyester	Napříč			Podél		
	E_o [GPa]	F_{\max} [N]	σ_{\max} [MPa]	E_o [GPa]	F_{\max} [N]	σ_{\max} [MPa]
n	10	10	10	10	10	10
Min	6,7	256,0	148,9	6,8	307,0	174,3
\bar{x}	6,9	273,2	158,3	7,2	349,5	197,1
Max	7,1	289,0	167,3	7,6	373,0	210,8
σ	0,1	13,8	7,7	0,3	25,8	13,8
v_x [%]	1,5	5,0	4,9	4,2	7,4	7,0



Obr. 36 Zkušební vzorek s porušením na tahové straně ve směru příčném vůči směru tažení při pultruzi



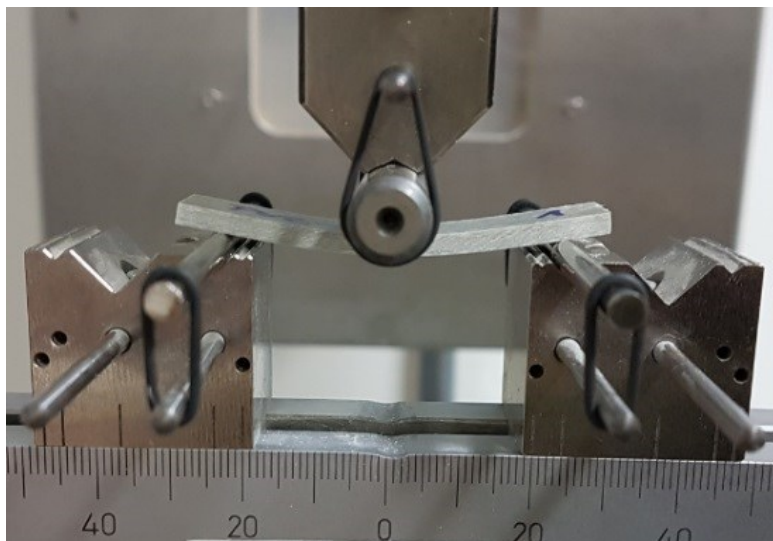
Obr. 37 Zkušební vzorek ve směru podélném vůči směru tažení při pultruzi

10.1.3 Profil s polyuretanovou matricí

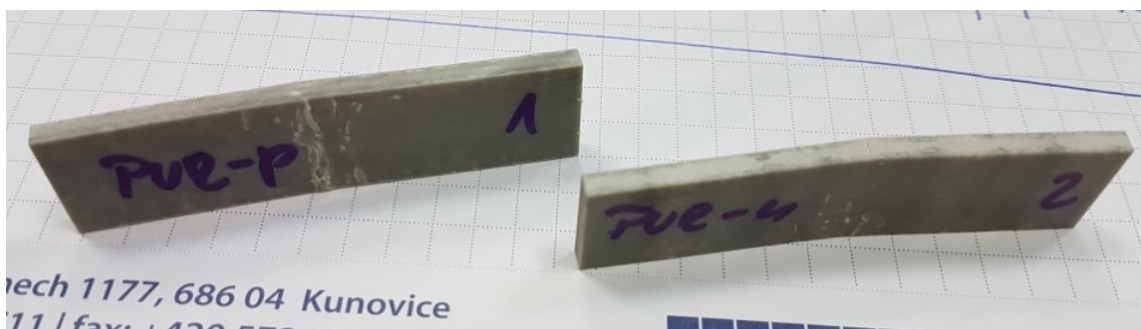
V tabulce 9 je vyhodnocení zkoušky pro vzorky připravené jak v podélném, tak i v příčném vůči směru tažení při pultruzi. Zaznamenanými a dále pak diskutovanými veličinami jsou modul pružnosti v ohybu E_o , maximální ohybová síla F_{\max} a mez pevnosti v ohybu σ_{\max} . Charakteristický typ porušení vzorků při zkoušce je znázorněn na obr. 38 a 39.

Tab. 9 Výsledky zkoušky 3 - bodovým ohybem profilu s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží

Polyuretan	Napříč			Podél		
	E_o [GPa]	F_{\max} [N]	σ_{\max} [MPa]	E_o [GPa]	F_{\max} [N]	σ_{\max} [MPa]
n	10	10	10	10	10	10
Min	10,3	408,0	233,4	16,4	942,0	563,7
\bar{x}	10,6	432,3	249,3	18,4	1060,0	613,2
Max	11,1	461,0	264,6	20,7	1173,0	663,0
σ	0,4	19,1	11,2	1,7	92,6	42,3
σ_x [%]	3,8	4,4	4,5	9,2	8,7	6,9



Obr. 38 Zkušební vzorek ve směru příčném vůči směru tažení při pultruzi



Obr. 39 Zkušební vzorky s porušením na tlakové straně v podélném a příčném směru
výztuže vůči směru tažení při pultruzi

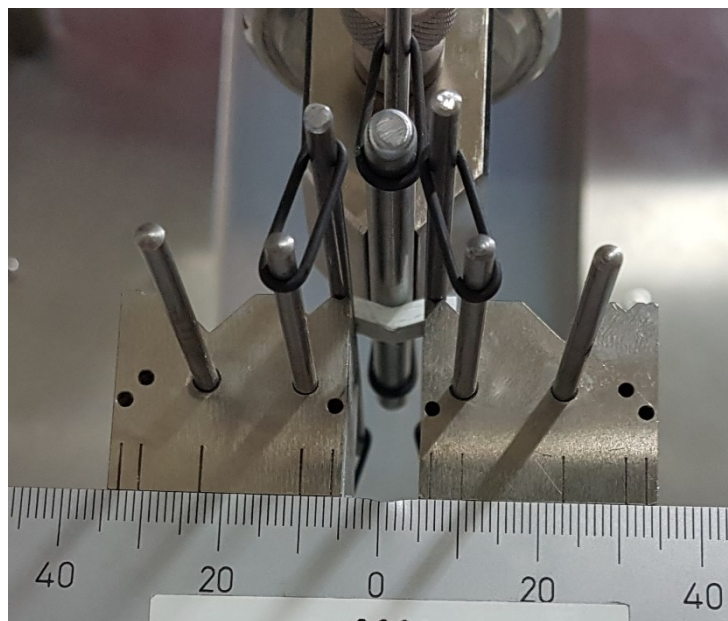
10.2 ASTM D 2344 - Zkouška ILSS (Interlaminar Shear Strength) – Interlaminární smyková pevnost

10.2.1 Profil s akrylátovou, polyesterovou a polyuretanovou matricí

V tabulce 10 je vyhodnocení zkoušky interlaminárním smykové pevnosti pro vzorky připravené jak v příčném, tak i v podélném směru vůči směru tažení při pultruzi. Ukázka zatížení vzorku při zkoušce je znázorněna na obr. 40. Vzhled zkušebních vzorků po zkoušce je zobrazen na obr. 41–43.

Tab. 10 Výsledky zkoušky interlaminární smykové pevnosti při použití akrylátové, polyesterové a polyuretanové matrice se skleněnou výztuží

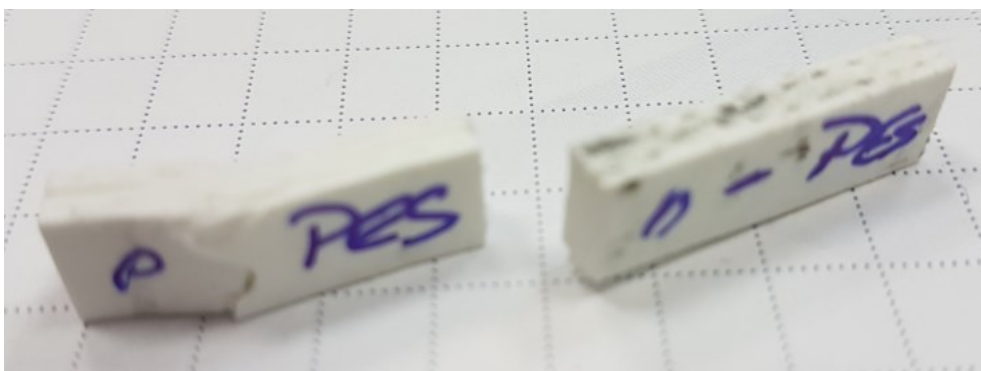
ILSS [N/mm ²]	Akrylát		Polyester		Polyuretan	
	Napříč	Podél	Napříč	Podél	Napříč	Podél
n	10	10	10	10	10	10
Min	12,6	16,9	11,8	18,0	26,2	43,6
\bar{x}	13,6	17,8	13,7	18,9	28,9	45,0
Max	15,0	18,7	16,1	19,8	30,7	46,3
σ	0,9	0,6	1,8	0,6	1,8	1,0
v_x [%]	6,6	3,4	13,1	3,2	6,2	2,2



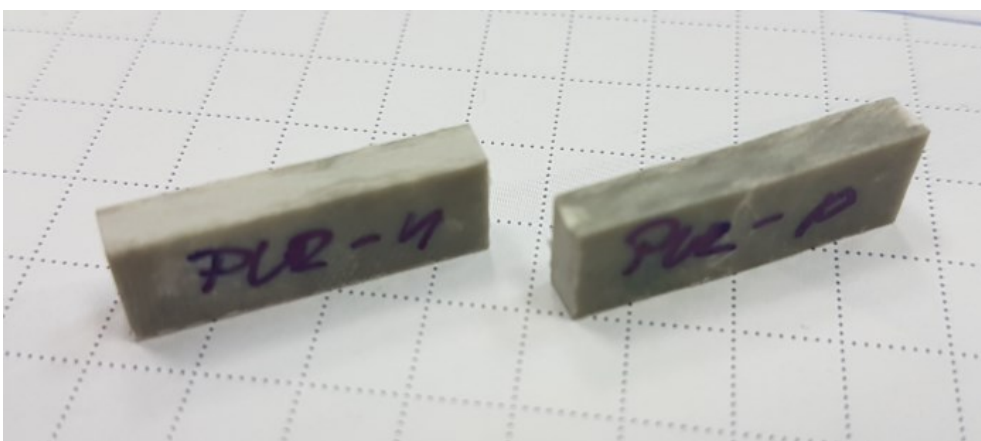
Obr. 40 Ukázka detailu zatěžování zkušebního vzorku při zkoušce interlaminární smykové pevnosti



Obr. 41 Zkušební vzorky s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží po zkoušce ve směru podélném a příčném vůči směru pultruze



Obr. 42 Zkušební vzorky s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží po zkoušce ve směru podélném a příčném vůči směru pultruze



Obr. 43 Zkušební vzorky s polyuretanovou matricí se skleněnou výztuží po zkoušce ve směru podélném a příčném vůči směru pultruze

10.3 ČSN EN ISO 179 - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy

10.3.1 Profil s akrylátovou maticí

V tabulkách 11 a 12 je vyhodnocení zkoušky pro vzorky připravené jak v podélném, tak i v příčném vůči směru tažení při pultruzi. Vzorky byly zkoušeny při orientaci XY (dopad na hranu – edgewise) a XZ (dopad na plochu – flatwise) vůči směru dopadajícího kladiva a charakteristické poruchy jsou znázorněny na obr. 44 a 45.

Tab. 11 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (maximální síla) u profilu s akrylátovou maticí se skleněnou výztuží

F_{\max} [N]	Podél		Napříč	
	XY	XZ	XY	XZ
n	10	10	10	10
Min	897,0	239,0	696,3	179,1
\bar{x}	956,7	277,1	760,1	215,9
Max	1025,5	318,5	835,6	268,9
σ	43,5	24,5	44,4	27,9
v_x [%]	4,5	8,8	5,8	12,9

Tab. 12 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (absorbovaná energie) u profilu s akrylátovou maticí se skleněnou výztuží

a_p [kJ/m ²]	Podél		Napříč	
	XY	XZ	XY	XZ
n	10	10	10	10
Min	128,1	98,3	64,7	35,7
\bar{x}	197,0	116,6	89,2	52,1
Max	276,1	137,1	122,6	72,3
σ	47,1	11,4	16,6	10,7
v_x [%]	23,9	9,8	18,6	20,5



Obr. 44 Příklad poruchy vzorku s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Y (edgewise – dopad na hranu)



Obr. 45 Příklad poruchy vzorku s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Z (flatwise – dopad na plochu)

10.3.2 Profil s polyesterovou maticí

V tabulkách 13 a 14 je vyhodnocení zkoušky pro vzorky připravené jak v podélném, tak i v příčném vůči směru tažení při pultruzi. Vzorky byly zkoušeny při orientaci XY (dopad na hranu – edgewise) a XZ (dopad na plochu – flatwise) vůči směru dopadajícího kladiva a charakteristické poruchy jsou znázorněny na obr. 46 a 47.

Tab. 13 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (maximální síla) u profilu s polyesterovou maticí se skleněnou výztuží

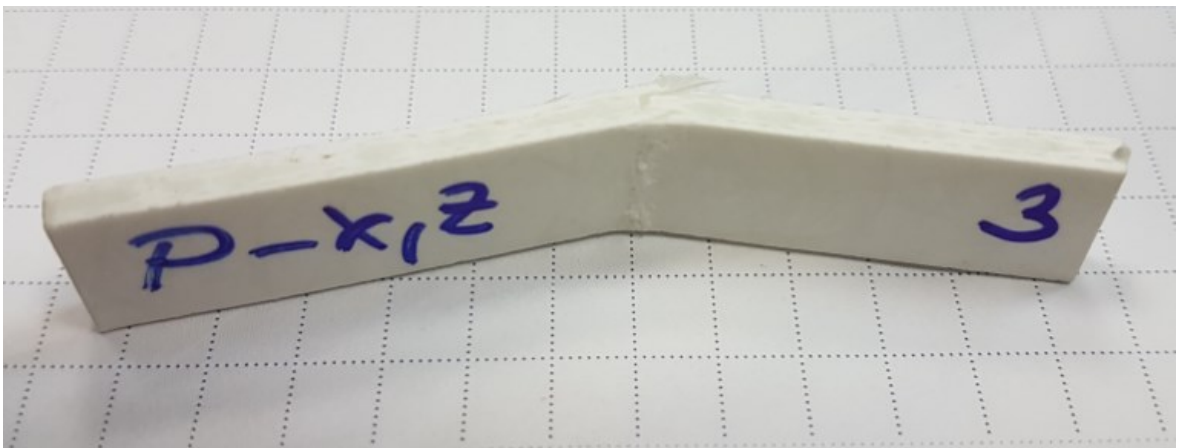
F_{\max} [N]	Podél		Napříč	
	XY	XZ	XY	XZ
n	10	10	10	10
Min	868,1	208,8	692,6	184,6
\bar{x}	924,6	236,6	747,4	203,0
Max	956,5	261,2	797,0	265,8
σ	34,1	19,1	39,4	31,2
v_x [%]	3,7	8,1	5,3	15,4

Tab. 14 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (absorbovaná energie) u profilu s polyesterovou maticí se skleněnou výztuží

ap [kJ/m ²]	Podél		Napříč	
	XY	XZ	XY	XZ
n	10	10	10	10
Min	141,9	78,3	82,4	41,9
\bar{x}	181,3	92,0	92,9	55,5
Max	202,8	114,1	102,7	72,2
S.O.	19,6	12,1	8,5	10,8
v_x [%]	10,8	13,2	9,1	19,5



Obr. 46 Příklad poruchy vzorku s polyesterovou matricí po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Y (edgewise – dopad na hranu)



Obr. 47 Příklad poruchy vzorku s polyesterovou matricí po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Z (flatwise – dopad na plochu)

10.3.3 Profil s polyuretanovou maticí

V tabulkách 15 a 16 je vyhodnocení zkoušky pro vzorky připravené jak v podélném, tak i v příčném vůči směru tažení při pultruži. Vzorky byly zkoušeny při orientaci XY (dopad na hranu – edgewise) a XZ (dopad na plochu – flatwise) vůči směru dopadajícího kladiva a charakteristické poruchy jsou znázorněny na obr. 48 a 49.

Tab. 15 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (maximální síla) u profilu s polyuretanovou maticí se skleněnou výztuží

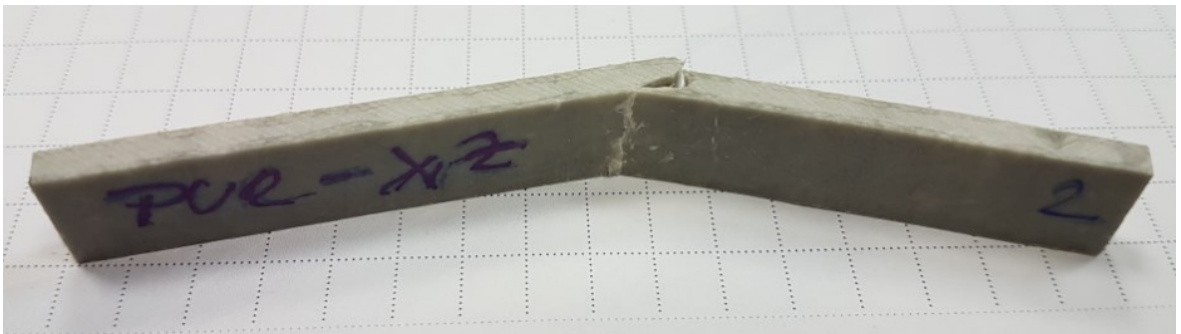
F_{\max} [N]	Podél		Napříč	
	XY	XZ	XY	XZ
n	10	10	10	10
Min	1608,3	528,6	914,3	325,2
\bar{x}	1708,1	593,7	1110,0	381,8
Max	1894,0	656,1	1218,0	463,8
S.O.	113,2	61,2	118,0	54,5
v_x [%]	6,6	10,3	10,6	14,3

Tab. 16 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (absorbovaná energie) u profilu s polyuretanovou maticí se skleněnou výztuží

a_p [kJ/m ²]	Podél		Napříč	
	XY	XZ	XY	XZ
n	10	10	10	10
Min	261,9	150,1	36,9	31,5
\bar{x}	297,1	187,8	54,2	43,5
Max	327,3	225,4	75,5	51,9
σ	23,9	32,0	14,3	7,6
v_x [%]	8,0	17,0	26,4	17,5



Obr. 48 Příklad poruchy vzorku s polyuretanovou matricí po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Y (edgewise – dopad na hranu)



Obr. 49 Příklad poruchy vzorku s polyuretanovou matricí po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Z (flatwise – dopad na plochu)

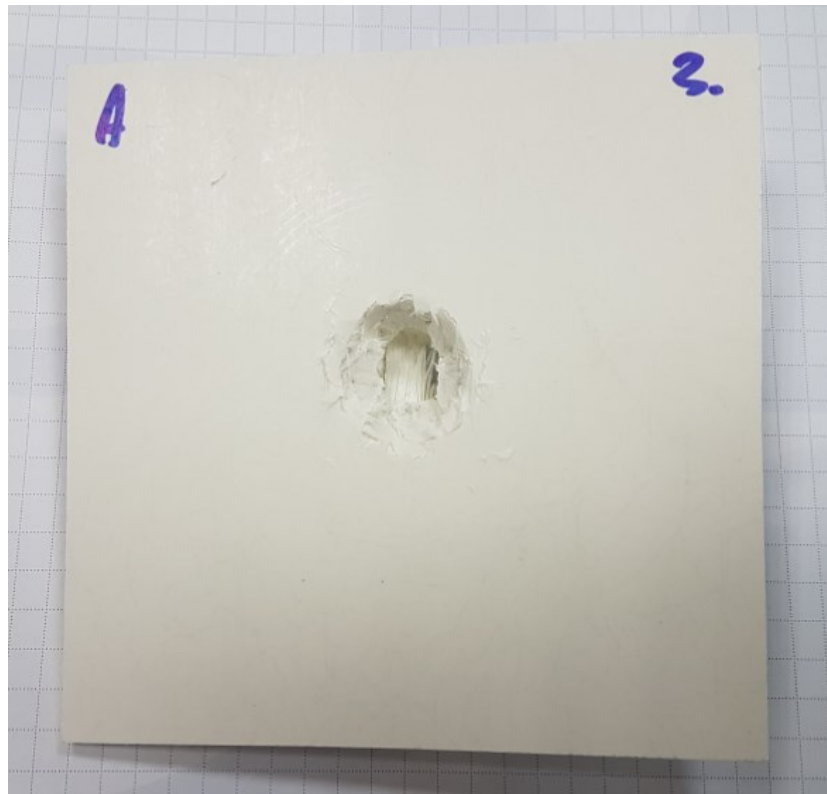
10.4 ASTM 5628 (ISO 6603) - Rázová zkouška pádem – Padostroj

10.4.1 Profil s akrylátovou, polyesterovou a polyuretanovou matricí

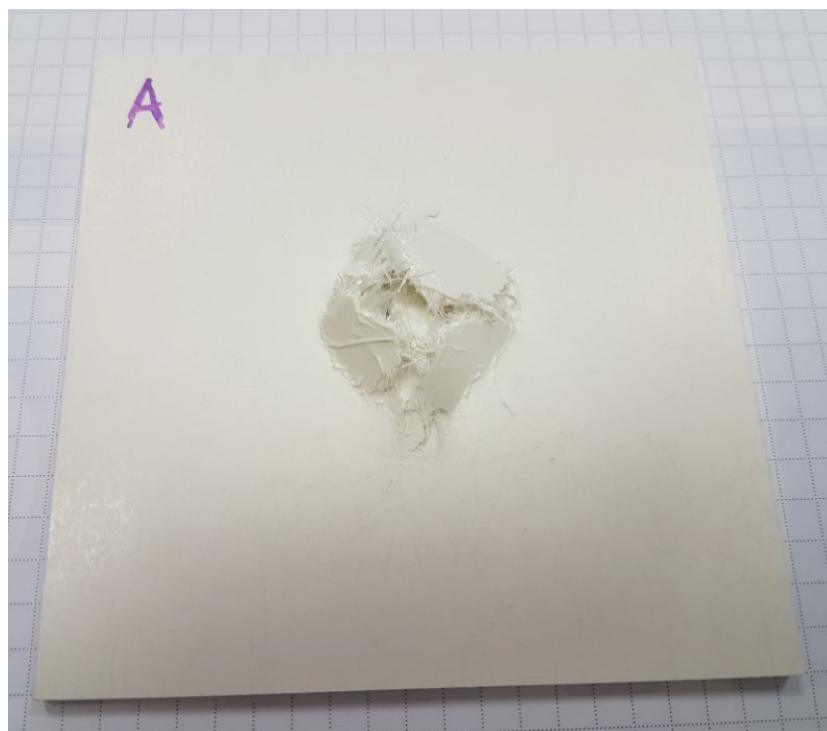
V tabulce 17 je vyhodnocení zkoušky pádem pomocí Padostroje. Vzhled zkušebních vzorků po zkoušce je zobrazen na obr. 50–55.

Tab. 17 Výsledky rázové zkoušky pádem při použití akrylátové, polyesterové a polyuretanové matrice se skleněnou výztuží

Padostroj	Akrylát		Polyester		Polyuretan	
	Fmax [N]	Ep [J]	Fmax [N]	Ep [J]	Fmax [N]	Ep [J]
n	10	10	10	10	10	10
Min	8385,8	29,4	7934,9	26,6	10800,3	44,0
\bar{x}	8767,7	35,0	8356,2	40,4	11337,8	49,6
Max	9085,7	42,1	9209,2	48,1	11756,7	53,3
σ	306,8	6,4	598,7	9,8	482,7	4,1
v_x [%]	3,5	18,3	7,2	24,3	4,3	8,3



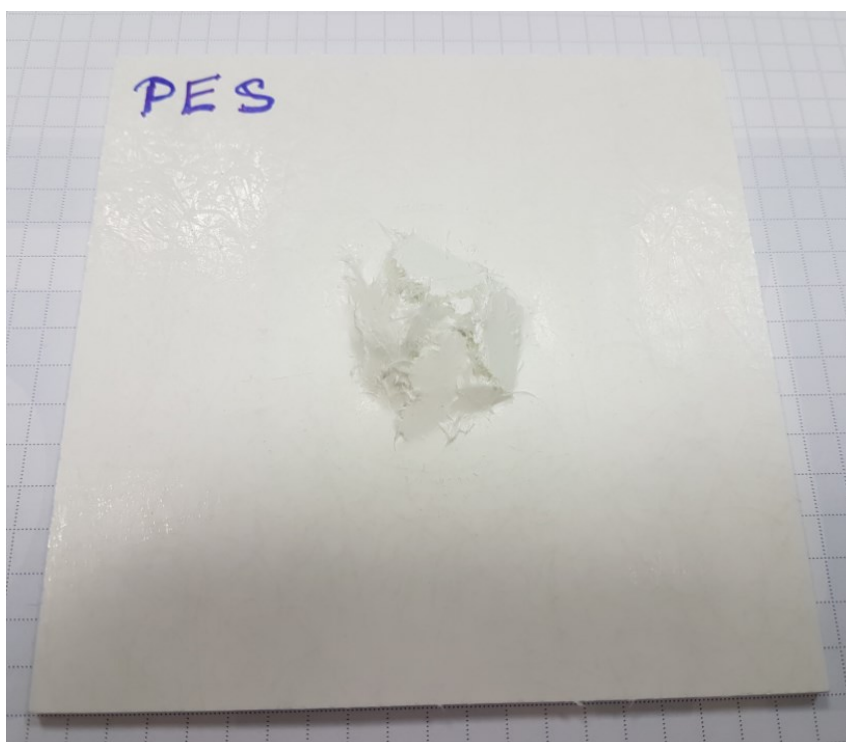
Obr. 50 Zkušební vzorek 1/2 (lícová strana) po zkoušce s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží



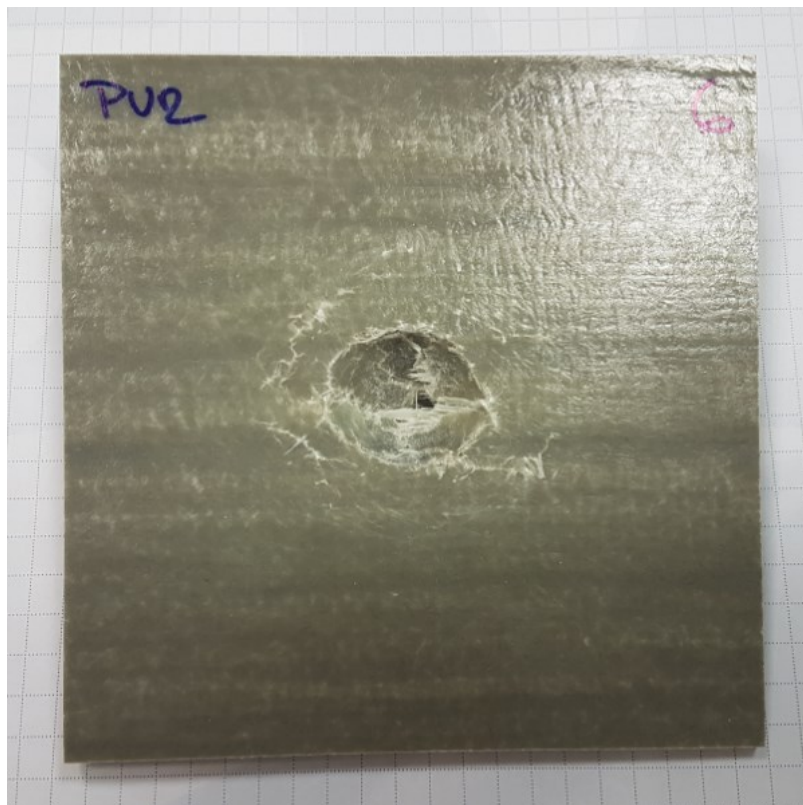
Obr. 51 Zkušební vzorek 2/2 (rubová strana) po zkoušce s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží



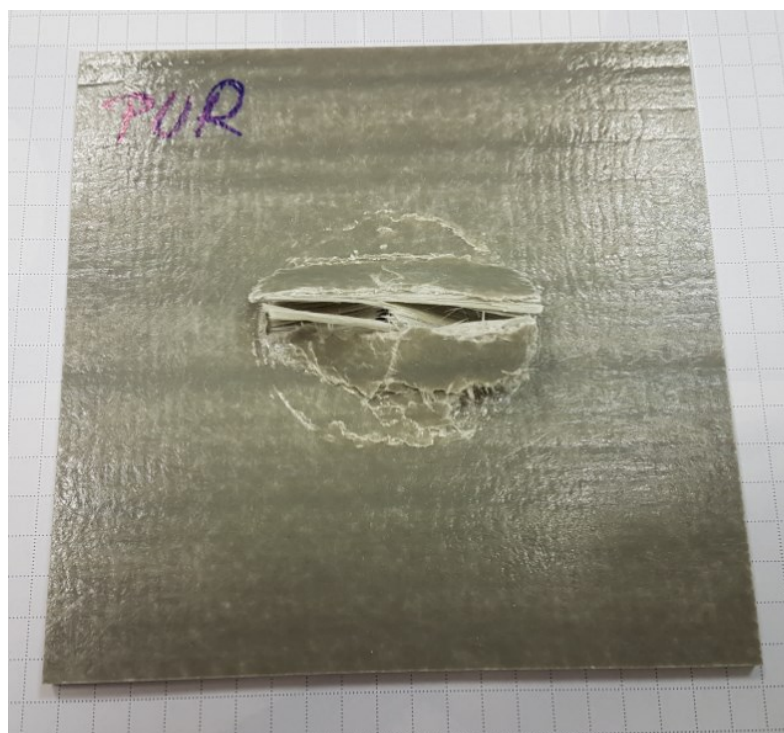
Obr. 52 Zkušební vzorek 1/2 (lícová strana) po zkoušce s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží



Obr. 53 Zkušební vzorek 2/2 (rubová strana) po zkoušce s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží



Obr. 54 Zkušební vzorek 1/2 (lícová strana) po zkoušce s polyuretanovou matricí se skleněnou výztuží



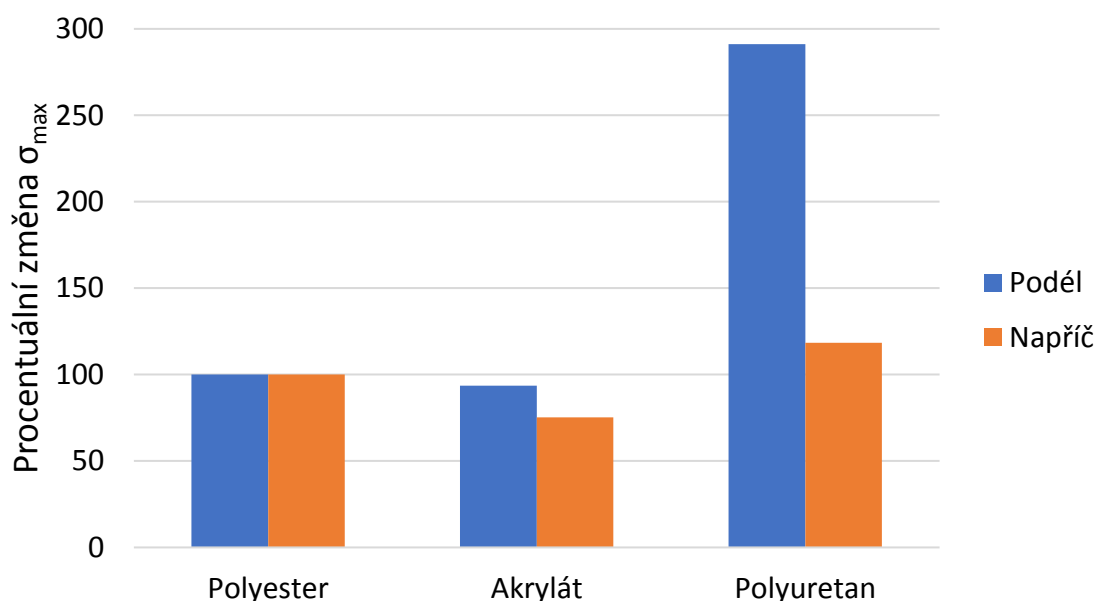
Obr. 55 Zkušební vzorek 2/2 (rubová strana) po zkoušce s polyuretanovou matricí se skleněnou výztuží

11 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

11.1 ČSN EN ISO 178 - Plasty - Stanovení ohybových vlastností

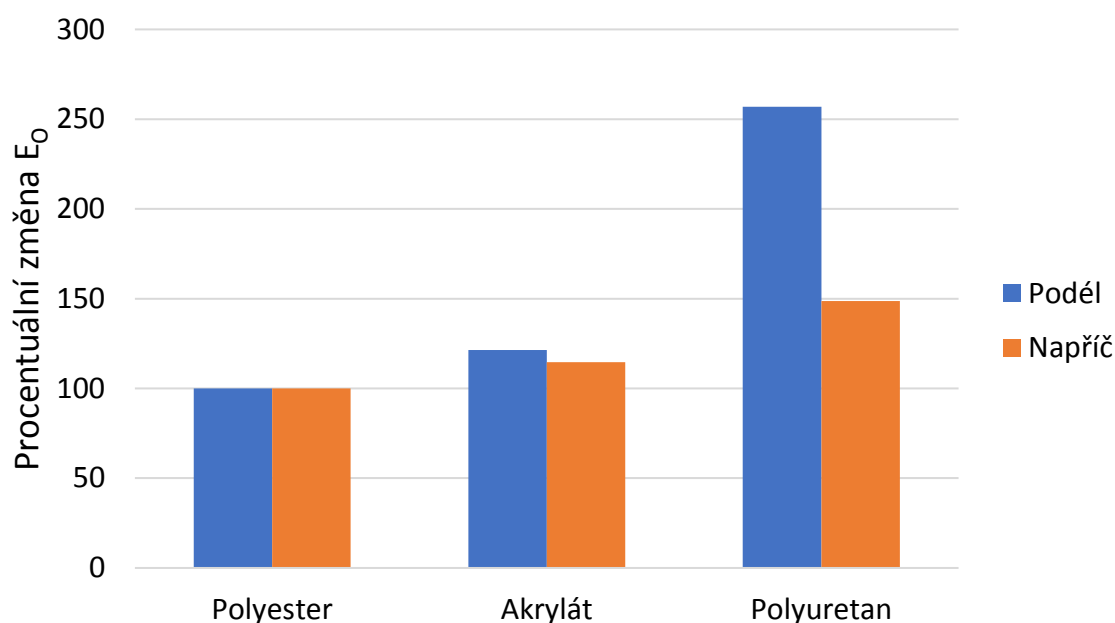
Graf 1 obsahuje porovnání výsledků zkoušky (pro mez pevnosti v ohybu) pro profily s různými matricemi prováděné na vzorcích odebíraných z pultruzních profilů podél a napříč vůči směru tažení při výrobě technologií pultruze. Jako vztažný materiál byl uvažován profil s polyesterovou matricí, proto jeho mechanické vlastnosti jsou v úrovni 100 % a ostatní 2 matrice (akrylátová a polyuretanová) jsou uvedeny poměrově.

Z dosažených výsledků je patrné, že dosažená mez pevnosti v ohybu je téměř stejná u polyesterové a akrylátové matrice, naproti tomu materiál s polyuretanovou matricí vykazuje přibližně 3násobné zvýšení ve směru podélném a přibližně 1,3násobné zvýšení ve směru příčném. Vzorky s polyuretanovou matricí mají dokonce i v příčném směru větší pevnost než vzorky s ostatními matricemi ve směru podélném.



Graf 1 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze

V následujícím grafu 2 je znázorněna závislost modulu pružnosti v ohybu pro kompozice s různými matricemi opět v poměrných hodnotách vztažených vůči modulu pružnosti systému s polyesterovou matricí. Modul pružnosti v ohybu vykazuje téměř shodné hodnoty ve směru podélném a příčném u vzorků s polyesterovou a akrylátovou matricí. Vzorky s polyesterovou matricí mají přibližně o 20 % nižší modul než vzorky s akrylátovou matricí. Oproti tomu, použití polyuretanové matrice způsobilo výrazné zvýšení modulu v obou směrech, a výsledky tak vykazují obdobný trend jako u meze pevnosti v ohybu.

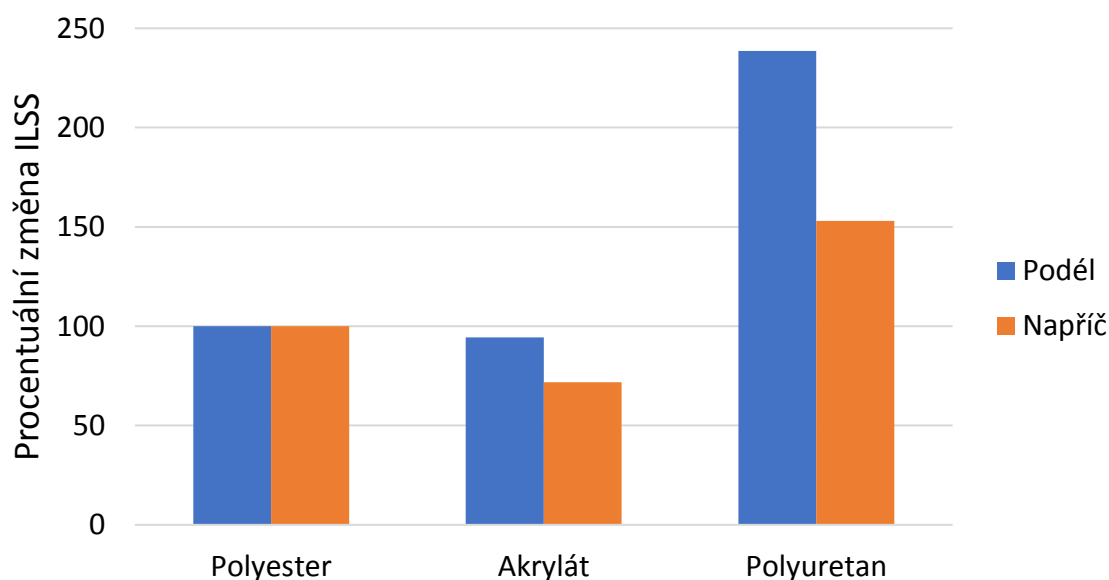


Graf 2 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze

11.2 ASTM D 2344 - Zkouška ILSS (Interlaminar Shear Strength) – Interlaminární smyková pevnost

Jak je vidět v grafu 3 obsahuje porovnání výsledků zkoušky (pro interlaminární smykovou pevnost-ILSS) pro jednotlivé profily s různými matricemi prováděných na vzorcích, které byly odebírány z pultruzních profilů podél a napříč vůči směru jejich tažení při výrobě technologií pultruze. Jako vztažný materiál byl uvažován opět profil s polyesterovou matricí, proto jeho mechanické vlastnosti jsou opět na úrovni 100 % a ostatní matrice (akrylátová a polyuretanová) jsou uvedeny poměrově.

Z dosažených výsledků je patrné, že dosažená interlaminární smyková pevnost v podélném směru je téměř stejná u polyesterové a akrylátové matrice, ale u akrylátové matrice v příčném směru je přibližně o 28 % nižší. Naopak u polyuretanové matrice je pevnost jak v podélném i příčném směru podstatně vyšší.

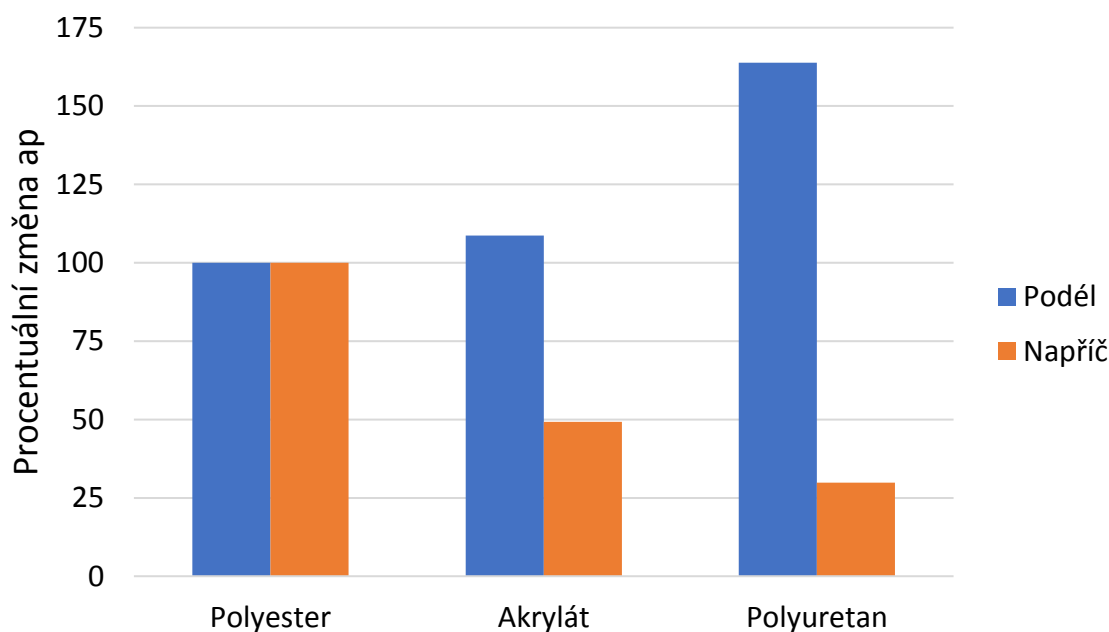


Graf 3 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze

11.3 ČSN EN ISO 179 - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy

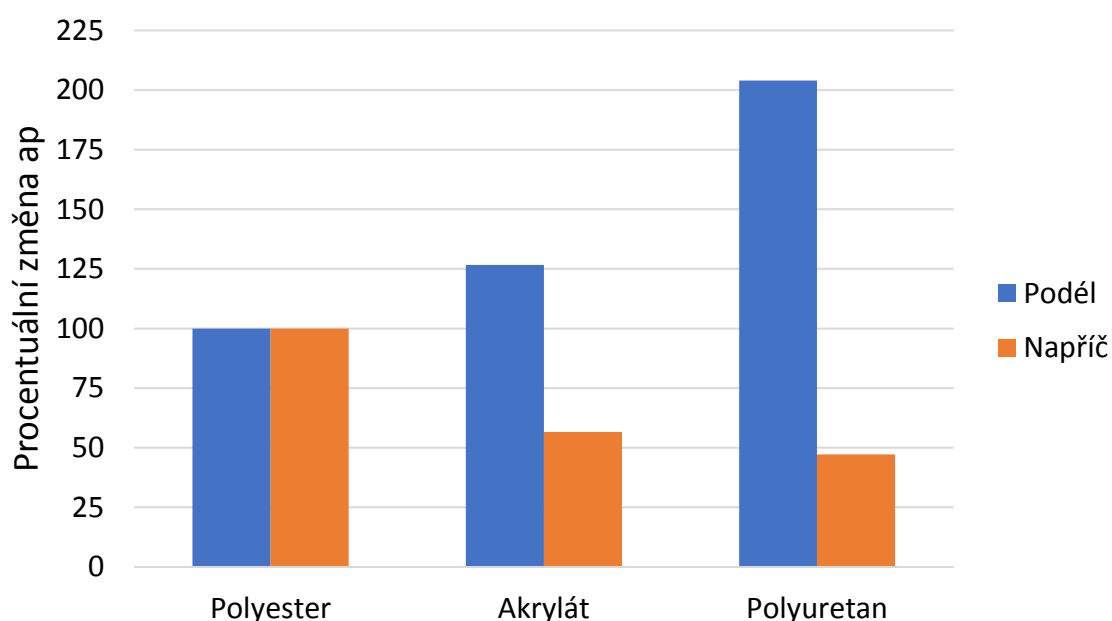
Graf 4 a 5 obsahuje porovnání výsledků zkoušky (pro rázovou zkoušku houževnatosti) pro profily s různými matricemi prováděné na vzorcích opět odebíraných z pultruzních profilů podél a napříč vůči směru jejich tažení při výrobě technologií pultruze. Jako vztažný materiál byl opět uvažován profil s polyesterovou matricí, proto jeho vlastnosti jsou v úrovni 100 % a ostatní 2 matrice (akrylátová a polyuretanová) jsou uvedeny poměrově.

Z dosažených výsledků v grafu 4 vidíme procentuální změnu a_p mezi polyesterovou a akrylátovou matricí, která v podélném směru je totožná a příčném směru akrylátová matrice vykazuje přibližně o 50 % nižší hodnoty. V tomto případě polyuretanová matrice vůči ostatním má v podélném směru výrazně vyšší procentuální hodnotu a_p než v příčném směru, kde naopak je výrazně nižší vůči ostatním matricím.



Graf 4 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze

Z dosažených výsledků v grafu 5 vidíme procentuální změnu a_p mezi polyesterovou a akrylátovou matricí se skleněnou výztuží, která v podélném směru je o přibližně 26 % vyšší než v příčném směru, kde jsou hodnoty přibližně o polovinu nižší. V tomto případě polyuretanová matrice se skleněnou výztuží vůči ostatním matricím se chová totožně, jako v předchozím případě.

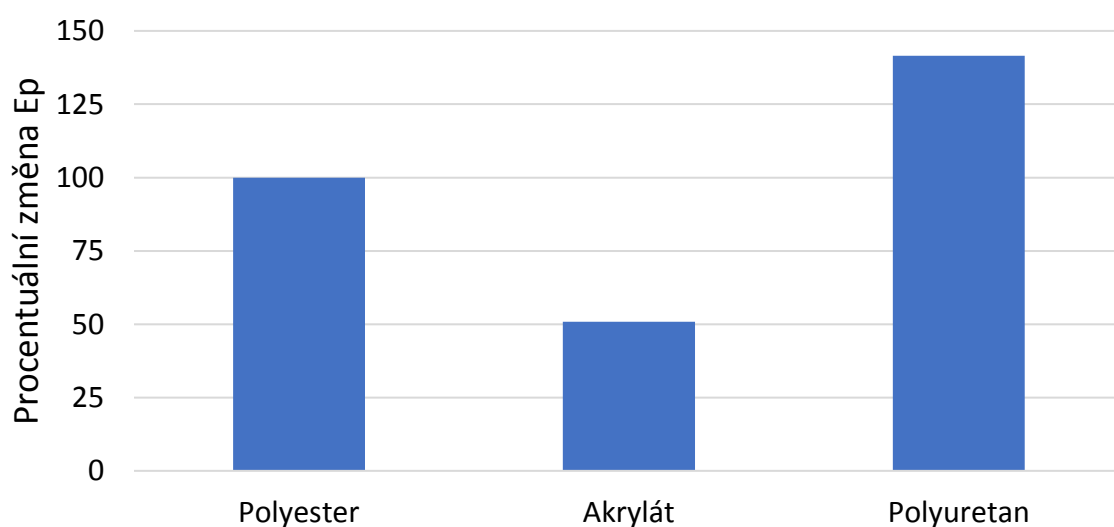


Graf 5 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze

11.4 ČSN EN ISO 6603 – Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při vícešém rázovém namáhání - Metoda padajícího tlouku

Graf 6 znázorňuje porovnání výsledků zkoušky (pro rázovou zkoušku pádem-padostroj) pro profily s různými matricemi se skleněnou výztuží, prováděné na vzorcích ve formě destiček vyřezaných z pultruzních profilů. Jako vztažný materiál byl opět uvažován profil s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží, proto jeho mechanické vlastnosti jsou v úrovni 100 % a ostatní 2 matrice se skleněnou výztuží (akrylátová a polyuretanová) jsou uvedeny poměrově.

Z dosažených výsledků je patrné, že vyvolaná potenciální energie u akrylátové matrice se skleněnou výztuží, vůči polyuretanové matrice se skleněnou výztuží je o polovinu nižší. Naopak je tomu u polyuretanové matrice se skleněnou výztuží, která vykazuje o podstatně vyšší hodnoty vůči ostatním matricím se skleněnou výztuží.



Graf 6 Procentuální porovnání jednotlivých matric se skleněnou výztuží

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá hodnocením vlastností kompozitních materiálů vyráběných technologií pultruze s využitím shodného typu výztuže a 3 polymerních matric se skleněnými výztužemi – polyesterové, akrylátové a polyuretanové. Touto technologií se nejčastěji vyrábí profily různých tvarů a rozměrů. Jedna z nesporných výhod této technologie spočívá v dosažení vysoké míry naplnění profilu vláknitou výztuží, což pozitivně ovlivňuje mechanické vlastnosti, zejména v podélném směru (směr orientace dlouhých vláken a zároveň směr tažení profilů). Pro vzájemné porovnání vlastností se využilo výsledků statických zkoušek (3bodový ohyb, interlaminární smyková pevnost) a dynamických zkoušek (rázové zkouška metodou Charpy a rázová zkouška padajícím závažím - Padostroj). Dosažené výsledky ukázaly, že v případě statického namáhání vykazuje nejlepší vlastnosti kompozice profilu s polyuretanovou matricí. Rozdíly ve vlastnostech profilů s polyesterovou a akrylátovou matricí byly velmi malé. Kompozice s polyuretanovou matricí překonávala ostatní až dvojnásobně.

Z výsledků dynamických zkoušek vyplynulo rozdílné chování v případě malých zkušebních vzorků (metoda Charpy) a velkých zkušebních těles pro rázovou zkoušku pádem pomocí padostroje. U velkých vzorků byla rázová odolnost nejvyšší u profilů s polyuretanovou matricí. U malých zkušebních vzorků ve směru příčném vůči hlavnímu směru výztuže (směr tažení při pultruzi) byl však pozorován trend opačný a vzorky s polyuretanovou matricí vykazovaly nejmenší rázovou houževnatost. Při srovnání výsledků zkoušky, provedené na vzorcích přerážených v rovině XY (edgewise – dopad na hranu), byla rázová houževnatost nižší než v případě vzorků přerážených v rovině XZ (flatwise – dopad na plochu). Tyto rozdíly vedou k závěru, že v situacích, kdy hraje při rázové zkoušce hlavní roli matrice (směr příčný), je systém s polyuretanovou matricí citlivý na přítomnost případných vrubů, jako iniciačních míst pro šíření trhliny. Řezání zkušebních vzorků přináší vznik drobných nerovností (vrubů) na řezané ploše a tyto pak patrně zeslabily odolnost vzorků s polyuretanovou matricí při rázové zkoušce. Trend je jasně patrný v řadě velikostí vzorků (tím pádem možném ovlivnění místa dopadu kladiva/tlouku) – deska (padostroj – tlouk dopadá doprostřed desky), vzorek XZ (Charpy – kladivo dopadá na plochu vzorku) a vzorek XZ (Charpy – kladivo dopadá na hranu vzorku). Pokud je však namáhání vzorků vedeno ve směru hlavní výztuže (směr tažení při pultruzi), vykazují profily s polyuretanovou matricí jasně lepší všechny sledované vlastnosti než s matricí polyesterovou či akrylátovou.

Získané poznatky naleznou využití při dalším vývoji materiálů použitých u technologie pultruze i při konstrukci výrobků ve společnosti 5M, s.r.o. Hlavními uvažovanými aplikacemi budou díly v interiéru i exteriéru dopravních prostředků, zejména pro výrobu kolejových vozidel.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [2] KOŘÍNEK, Z Kompozity [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [3] BAREŠ, Richard. Kompozitní materiály. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [4] DAĐOUREK, K. Kompozity a definice [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defr ozd.pdf
- [5] ČVUT, Kompozitní materiály [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>
- [6] TICHÁ, P. Vliv typu výztuže na FST vlastnosti vláknitého kompozitu. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Soňa Rusnáková PhD., 2013. Zlín: FT UTB 111 s.
- [7] 5M, s. r. o. [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/produkty/kompozitni-profilu>
- [8] 5M, s. r. o. [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/odvetvi/zeleznicni-vozidla>
- [9] VŠTE, Kompozitní materiály [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/6936677/>
- [10] HROMADA, P. Mechanické vlastnosti pultruzních profilů. Bakalářská práce. Vedoucí práce doc. Ing. Soňa Rusnáková PhD., 2013. Zlín - FT UTB 98 s.
- [11] CARBON INSPIRATIONS [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://carboninspirations.com/ceskyindex.html>
- [12] JIRÁSEK, J. Studium tepelných vlastností kompozitních materiálů. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Dušan Fojtů, Ph.D., 2010. Zlín: FT UTB. 73 s.
- [13] VOJTĚCH, D. Materiály a jejich mezní stavy. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [14] PÍSAČKA, Petr. Využití moderních kompozitních materiálů ve sportovním odvětví: Bakalářská práce [online]. 2017 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: https://theses.cz/id/0u5vis/Bakal_sk_prce_-_Vyu_it_kompozitnich_materil_ve_sportovnm_.pdf
- [15] *Shenzhen Jinhua elektronické materiály Co., Ltd* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://cz.bestepoxyresins.com/info/polyurethane-resin-vs-polyesther-resin-23595493.html>

- [16] ZCU.CZ, Zkoušení materiálů [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/material2.pdf>
- [17] KRATOCHVÍL, B., Švorčík, V., Vojtěch, D. Úvod do studia materiálů. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005.
- [18] ŠTĚPEK, J. Technologie zpracování a vlastnosti plastů, SNTL Praha, 1988
- [19] HAMERNÍK, J. *Vlastnosti materiálů* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [20] PREFA KOMPOZITY, Kompozitní profily [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/produkt/kompozitni-profil-y-prefen>
- [21] JANČÁŘ, J.: 8. mezinárodní konference strojů a zpracování plastů. Brno 1996
- [22] PAVLICA, R.: Vytvrzování polymerní matrice kompozitů. Doktorská disertační práce. Zlín, UTB FT, 2003
- [23] VAŇKOVÁ, M. Měření krípvých vlastností polymerních kompozitů se skleněnou výztuží připravených technologií pultruze. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Slobodian Ph.D., 2011. Zlín: FT UTB 84 s.
- [24] FORM, s. r. o. [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/technologie>
- [25] KNOT, Tomáš. CNC obrábění a technologie přípravy tvarově složitých sendvičových jader: Bakalářská práce [online]. 2011 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/14044166-Cnc-obrabeni-a-technologie-pripravy-tvarove-slozitych-sendvicovych-jader-tomas-knot.html>
- [26] GDP KORAL COMPOSITES, Sport a volný čas [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/sport-a-volny-cas/p134>
- [27] TECHNOFIBER, Sportovní potřeby [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.technofiber.cz/sport_potreby.cz.html
- [28] SPOLEK PRO TECHNICKOU PODPORU A PROPAGACI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://polymer-composites.cz/pultrusion/>
- [29] ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITŮ [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/18.html>
- [30] ČSN EN ISO 178 – Plasty - Stanovení ohybových vlastností [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.technickenormy.cz/csn-en-iso-178-plasty-stanoveni-ohybovych-vlastnosti/>

- [31] ČSN EN ISO 179 – Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/640612-csn-en-iso-179_4_51264.html
- [32] ČSN EN ISO 6603-1 - Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání - Část 1: Metoda padajícího tlouku [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/640628-csn-en-iso-6603-1_4_51957.html
- [33] ASTM D 2344 - Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/249558382/Norme-ASTM-D-2344-D-2344M-01-pdf>
- [34] LABOR machine, s. r. o. [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.edb.cz/grmat/prosp/LabControl-P3.pdf>
- [35] Review of the applications of biocomposites in the automotive industry [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pc.23847>
- [36] Glass fiber-reinforced polymer composites – a review [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0731684414530790>
- [37] Pultrusion of Composite Profiles – Polyurethane (PU) as Alternative Matrix System [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.polymerjournals.com/pdfdownload/1081686.pdf>
- [38] Evaluation on material behaviors of pultruded glass fiber reinforced polymer (GFRP) laminates [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.journals.elsevier.com/composite-structures>
- [39] POLYMER COMPOSITE MANUFACTURING USING A PULTRUSION PROCESS: A REVIEW [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://thescipub.com/pdf/10.3844/ajassp.2014.1798.1810>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PAN	Polyakrylonitrid
T_g	Teplota skelného přechodu
T_d	Teplota pultruzní hlavy
E_o	Modul pružnosti v ohybu
E_p	Potenciální energie
F_{max}	Maximální síla na průřez
σ_{max}	Maximální mez pevnosti v ohybu
n	Počet měření
\bar{x}	Aritmetický průměr
σ	Směrodatná odchylka
v_x	Variační koeficient
a_p	Absorbovaná energie

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Částicový kompozit (izometrický) [2]</i>	14
<i>Obr. 2 Částicový kompozit (anizometrický) [2]</i>	14
<i>Obr. 3 Vláknový kompozit [2]</i>	14
<i>Obr. 4 Jednotlivé tvary a rozměry částic pro použití vyztužení kompozitu [2]</i>	15
<i>Obr. 5 Dělení kompozitních materiálů [2]</i>	16
<i>Obr. 6 Uspořádání vláknové výztuže v kompozitech a) jednosměrné b) tkaniny c) rohože d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken e) krátká vlákna orientovaná jednosměrně f) krátká vlákna s nahodilou orientací [2]</i>	17
<i>Obr. 7 Vizualizace kolejové soupravy - projekt Siemens RRX [8]</i>	19
<i>Obr. 8 Vizualizace vnitřního interiéru-projekt Siemens RRX [8]</i>	20
<i>Obr. 9 Vizualizace tramvaje projekt-Bombardier [8]</i>	21
<i>Obr. 10 Navinutá cívka (roving) [9]</i>	23
<i>Obr. 11 Uhlíková vlákna [11]</i>	25
<i>Obr. 12 Druhy jednotlivých vazeb tkanin [2]</i>	27
<i>Obr. 13 Trup lodě z polyesterové pryskyřice v praxi [14]</i>	31
<i>Obr. 14 Vznik prasklin v matrici - mikrostruktura jednosměrně vyztužené vrstvy kompozitu [1]</i>	34
<i>Obr. 15 T-T-T diagram [17]</i>	36
<i>Obr. 16 Schéma pultruzních (tažných linek) s otevřenou lázní 2) s přímým přívodem pryskyřice [21]</i>	40
<i>Obr. 17 Pultruzní linka [20]</i>	41
<i>Obr. 18 Rozdělení teplot formy T_d, vytvrzované směsi T_m, tlaku p, viskozity V po délce pultruzní formy [22]</i>	43
<i>Obr. 19 1.) Zásobník výztuží, 2.) Naváděcí zařízení, 3.a 4.) Proces smáčení, 6.) Tažná sekce a řezání materiálu [20]</i>	44
<i>Obr. 20 Ruční laminace válečkem za mokra [25]</i>	46
<i>Obr. 21 Kryt strojových komponentů u autobusů [24]</i>	47
<i>Obr. 22 Technologie výroby pod fólií (plachetkou)</i>	47
<i>Obr. 23 Schéma pultruzní (tažné) linky – 1.) Vlákná (rovingy), 2.) Forma, 3.) Forma, 4.) Řezání [26]</i>	51
<i>Obr. 24 Výrobní linka [28]</i>	52
<i>Obr. 25 Výrobní linka (umístění a navádění rohoží, rovingů) [29]</i>	53

<i>Obr. 26 Výrobní linka (výstup z formy a tvar finálního výrobku)</i>	54
<i>Obr. 27 Schéma skladby výrobku</i>	60
<i>Obr. 28 Zkušební materiál ve formě finálního výrobku 1/2</i>	61
<i>Obr. 29 Zkušební materiál ve formě finálního výrobku 2/2</i>	61
<i>Obr. 30 Testovací stroj TESTOMETRIC M500-100 CT</i>	62
<i>Obr. 31 Testovací stroj ZWICK/ROELL HIT 50 P</i>	63
<i>Obr. 32 Testovací stroj ZWICK/ROELL HIT 230 F</i>	64
<i>Obr. 33 Probíhající testování 3 - bodový ohyb</i>	65
<i>Obr. 34 Zkušební vzorek s porušením na tahové straně ve směru příčném vůči směru tažení při pultruzi</i>	66
<i>Obr. 35 Zkušební vzorek ve směru podélném vůči směru tažení při pultruzi</i>	67
<i>Obr. 36 Zkušební vzorek s porušením na tahové straně ve směru příčném vůči směru tažení při pultruzi</i>	68
<i>Obr. 37 Zkušební vzorek ve směru podélném vůči směru tažení při pultruzi</i>	68
<i>Obr. 38 Zkušební vzorek ve směru příčném vůči směru tažení při pultruzi</i>	69
<i>Obr. 39 Zkušební vzorky s porušením na tlakové straně v podélném a příčném směru výztuže vůči směru tažení při pultruzi</i>	69
<i>Obr. 40 Ukázka detailu zatěžování zkušebního vzorku při zkoušce interlaminární smykové pevnosti</i>	70
<i>Obr. 41 Zkušební vzorky s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží po zkoušce ve směru podélném a příčném vůči směru pultruze</i>	71
<i>Obr. 42 Zkušební vzorky s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží po zkoušce ve směru podélném a příčném vůči směru pultruze</i>	71
<i>Obr. 43 Zkušební vzorky s polyuretanovou matricí se skleněnou výztuží po zkoušce ve směru podélném a příčném vůči směru pultruze</i>	71
<i>Obr. 44 Příklad poruchy vzorku s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Y (edgewise – dopad na hranu)</i>	73
<i>Obr. 45 Příklad poruchy vzorku s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Z (flatwise – dopad na plochu)</i>	73
<i>Obr. 46 Příklad poruchy vzorku s polyesterovou matricí po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Y (edgewise – dopad na hranu)</i>	75
<i>Obr. 47 Příklad poruchy vzorku s polyesterovou matricí po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Z (flatwise – dopad na plochu)</i>	75

<i>Obr. 48 Příklad poruchy vzorku s polyuretanovou matricí po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Y (edgewise – dopad na hranu)</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 49 Příklad poruchy vzorku s polyuretanovou matricí po dopadu kladiva v souřadnicovém systému X, Z (flatwise – dopad na plochu)</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 50 Zkušební vzorek 1/2 (lícová strana) po zkoušce s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 51 Zkušební vzorek 2/2 (rubová strana) po zkoušce s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 52 Zkušební vzorek 1/2 (lícová strana) po zkoušce s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 53 Zkušební vzorek 2/2 (rubová strana) po zkoušce s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 54 Zkušební vzorek 1/2 (lícová strana) po zkoušce s polyuretanovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 55 Zkušební vzorek 2/2 (rubová strana) po zkoušce s polyuretanovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>81</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Specifikace a potřebné vlastnosti neupravených vláken [1]</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 2 Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních mat. [2]</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 3 Důležité vlastnosti pro výběr pryskyřice</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4 Popis stroje TESTOMETRIC M500-100 CT</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 5 Popis stroje ZWICK/ROELL HIT 50 P.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 6 Popis stroje ZWICK/ROELL HIT 230 F.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 7 Výsledky zkoušky 3 - bodovým ohybem profilu s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 8 Výsledky zkoušky 3bodovým ohybem profilu s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 9 Výsledky zkoušky 3 - bodovým ohybem profilu s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 10 Výsledky zkoušky interlaminární smykové pevnosti při použití akrylátové, polyesterové a polyuretanové matrice se skleněnou výztuží</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 11 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (maximální síla) u profilu s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 12 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (absorbovaná energie) u profilu s akrylátovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 13 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (maximální síla) u profilu s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 14 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (absorbovaná energie) u profilu s polyesterovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 15 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (maximální síla) u profilu s polyuretanovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 16 Výsledky rázové zkoušky metodou Charpy (absorbovaná energie) u profilu s polyuretanovou matricí se skleněnou výztuží</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 17 Výsledky rázové zkoušky pádem při použití akrylátové, polyesterové a polyuretanové matrice se skleněnou výztuží.....</i>	<i>78</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze</i>	<i>82</i>
<i>Graf 2 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze</i>	<i>83</i>
<i>Graf 3 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze</i>	<i>84</i>
<i>Graf 4 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze</i>	<i>85</i>
<i>Graf 5 Procentuální porovnání jednotlivých matric v podélném a příčném směru vůči směru pultruze</i>	<i>86</i>
<i>Graf 6 Procentuální porovnání jednotlivých matric se skleněnou výztuží</i>	<i>87</i>