

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

PREPREGY S TERMOPLASTICKOU MATRICÍ

THERMOPLASTIC PREPREGS

AUTOR: Bc. KATEŘINA RUSŇÁKOVÁ

STUDIJNÍ PROGRAM: VÝROBNÍ A MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. ZDEŇKA JENÍKOVÁ, Ph.D.

PRAHA 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rusňáková** Jméno: **Kateřina** Osobní číslo: **424650**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Prepregy s termoplastickou maticí

Název diplomové práce anglicky:

Thermoplastic prepregs

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je vytvořit prepreg na bázi čedičové nebo kevlarové tkaniny s termoplastickou maticí.

Postup:

Seznámení se s problematikou přípravy prepregů všeobecně.

Navržení a odzkoušení různých technologií přípravy prepregu v rámci laboratoří ÚMI.

Vyrobení vzorků pro vybrané způsoby měření vlastností.

Na základě výsledků testování doporučit technologické podmínky přípravy a metody testování prepregu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] OSSWALD, Tim A. International plastics handbook: the resource for plastics engineers. Munich: Hanser, c2006. ISBN 1-56990-399-9.
- [3] GERDEEN, James C. Engineering Design with Polymers and Composites. Second Edition. Hoboken: CRC Press, 2012. ISBN 9781439860533.
- [4] Polymer testing. 2nd ed. Editor Wolfgang GRELLMANN, editor Sabine SEIDLER. Munich: Hanser, c2013. ISBN 978-1-56990-548-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **23.10.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.01.2019**

Platnost zadání diplomové práce:


Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

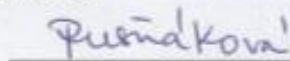

prof. RNDr. Petr Špatek, C.Sc.
podpis vedoucí(ho) katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis konzultant

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29.10.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Diplomová práce pojednává o prepregu s termoplastickou matricí s výztuží z čedičové nebo kevlarové tkaniny, jeho vlastnostech, výrobě a zkušebních metodách. Praktická část práce blíže popisuje výrobu zkušebních těles a metody jejich zkoušení. V závěru práce jsou sepsána doporučení pro přípravu a testování těchto prepregů.

Klíčová slova

Prepreg, prepreg s termoplastickou matricí, výztuž, čedičová tkanina, kevlarová tkanina, laminát

Annotation

The diploma thesis deals with thermoplastic prepreg and reinforcement from basalt or kevlar fabric, its properties, production and testing methods. The practical part of this diploma thesis describes production of test specimens and testing methods. In the end are suggestions for future progression and testing of these prepregs.

Keywords

Prepreg, thermoplastic prepreg, reinforcement , basalt fabric, kevlar fabric, laminate

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat své vedoucí práce, paní Ing. Zdeňce Jeníkové Ph.D. za odbornou pomoc při psaní této diplomové práce.

Obsah

I - TEORETICKÁ ČÁST	1
1 ÚVOD.....	2
2 PŘEHLED POJMŮ.....	3
3 PREPREGY.....	4
3.1 Výhody a nevýhody prepregů.....	5
3.2 Oblasti použití prepregů.....	6
3.3 Vývojové směry ve výrobě prepregů.....	8
4 VÝZTUŽE PRO POLYMERNÍ MATRICE.....	9
4.1 Lamináty.....	11
4.2 Vyztužující účinek vláken.....	12
4.3 Druhy vazeb tkanin.....	12
4.4 Typy tkanin.....	13
4.5 Dodávané formy vláken	14
4.6 Materiály výztuže pro polymerní matrice	18
4.6.1 Skleněná vlákna (Glass Fibers)	21
4.6.2 Uhlíková vlákna (Carbon Fibers).....	22
4.6.3 Polymerní vlákna (Polymeric Fibers).....	23
4.6.4 Přírodní vlákna.....	26
4.6.5 Čedičová vlákna (Basalt Fibers).....	26
5 POLYMERNÍ MATRICE.....	29
5.1 Vazby v polymerech	30
5.2 Přísady v polymerech	31
5.3 Termoplastické matrice	31
5.3.1 Používané termoplasty.....	32
6 METODY VÝROBY PREPREGŮ	38

6.1	Metody výroby prepregů s polymerní matricí.....	39
6.1.1	Ruční kladení (ruční laminace).....	40
6.1.2	Impregnace pomocí rozpouštědla (Solvent Impregnation/ Solvend Dip Process).....	40
6.1.3	Tavení za tepla (Hot Melt Proces).....	42
6.1.4	Prokládání vyztužujících vláken matričními	45
6.1.5	Prášková metoda (powder scattering)	46
6.1.6	SMC materiály (Sheet Moulding Compound)	49
6.1.7	Společnosti vyrábějící prepregy	50
7	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	51
7.1	T – zkouška v odlupování lepených sestav z ohebných adherendů	51
7.2	Zkouška tříbodovým ohybem.....	52
7.3	Zkouška rázem v ohybu	54
7.4	Zkouška tahem	55
II	PRAKTICKÁ ČÁST	58
8	POPIS EXPERIMENTU A OČEKÁVANÝ PŘÍNOS	59
9	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES A ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	60
9.1	Použité materiály	60
9.1.1	Metoda DSC.....	60
9.2	Výroba zkušebních těles.....	61
9.3	Provedené zkoušky mechanických vlastností.....	61
9.3.1	T – zkouška.....	62
9.3.2	T – zkouška pro porovnání různých druhů tkanin	67
9.3.3	Zkouška tříbodovým ohybem pro porovnání různých typů tkanin.....	68
9.3.4	Zkouška tříbodovým ohybem nasáklých vzorků	77
9.3.5	Způsoby ruční výroby laminátů.....	80
9.3.6	Zjišťování adheze mezi vrstvami laminátu pozorováním na mikroskopu...	90
10	ZÁVĚR A DOPORUČENÍ	100

Seznam tabulek.....	105
Seznam obrázků	107
Citace	111
Seznam příloh.....	117

I - TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD

V dnešním světě rychlého technického pokroku je pro člověka často až nepředstavitelné, že vývoj nových zařízení, výrobních technologií a materiálů bude i nadále tímto tempem pokračovat. Vývoj v oblasti materiálového inženýrství je takřka nezastavitelný, jelikož výběr vhodného materiálu je vždy jednou ze stěžejních fází vývoje nového výrobku.

Tato práce se zabývá počátečním vývojem nového kompozitního materiálu, konkrétně prepregu s matricí z termoplastického polymeru polyethylenu a výztuží z čedičových nebo kevlarových vláken v podobě tkaniny. Takový kompozit není dosud běžně používán a snahou bylo zahájit první kroky jeho výroby. Prvotně získané poznatky z této práce a z nich vycházející doporučení by měly dále vést k vývoji a optimalizaci výrobního postupu a také k postupnému zlepšování mechanických vlastností daného materiálu.

Polyethylen tvořící matrici byl zvolen pro své rozšířené použití, nízkou cenu a jednoduchou zpracovatelnost. Po zvládnutí optimalizace výroby kompozitu s polyethylenovou matricí se však předpokládá jeho záměna v jiný termoplast s lepšími mechanickými vlastnostmi, např. některý z konstrukčních plastů. Nicméně čedič a kevlar jsou perspektivní z hlediska svých vlastností pro materiál výztuže.

Hlavní myšlenkou je snaha o budoucí uvedení prepregů s termoplastickou matricí na trh v automatizované velkosériové výrobě vedle již běžně používaných prepregů s reaktoplastickou matricí. Mělo by se převážně jednat o díly pro automobilový a letecký průmysl.

2 PŘEHLED POJMŮ

Kevlar – obchodní název para – aramidového (polymerního) vlákna

Kompozit – materiál tvořený dvěma složkami – vyztuží (výztuž) a pojivem (matrice)

Laminát – kompozit tvořený z více vrstev (lamin), které jsou navzájem spojeny v jeden celek

Matrice (matrix) – spojitá fáze kompozitu, jsou v ní uložena vlákna a spojuje kompozit v jeden celek

Nit – skládá se z jedné nebo více přízí, které jsou vzájemně spředeny

Osnova a útek – pravoúhlá soustava (systém) uspořádání vláken (také nití apod.) při tvorbě tkanin; podélná soustava – osnova, příčná - útek

Prepreg – kompozitní materiál, který je však zatím pouze polotovarem pro výrobu finální součásti

Rohož – plochý kompozit, skládající se z vyztužujících vláken různé délky (která nejsou pravidelně uspořádána ani tkána a mají nahodilou orientaci) uložených v pojivu

Roving (pramenec) – svazek sdružených rovnoběžných vláken nebo tažených přímo z taveniny

Tkanina (fabric) – plošný tkaný výrobek, jehož vlákna nebo prameny jsou uloženy pravoúhle v osnově a útku

Výztuž - vyztužující vlákno (fiber) – tvoří nespojitou část kompozitu, vyrábí se z různých materiálů a má již podle svého názvu vyztužující funkci

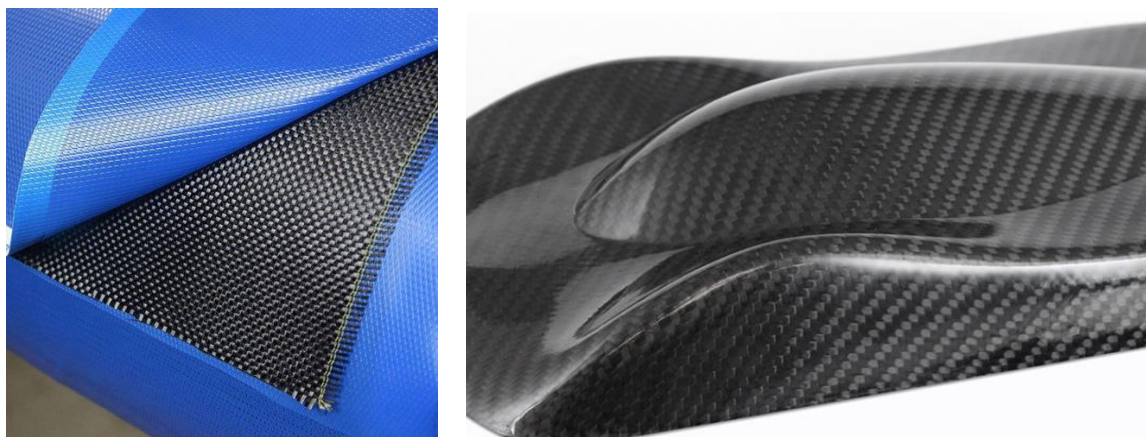
3 PREPREGY

Prepreg (Preimpregnated fibers) je polotovar pro výrobu kompozitního materiálu. Jako každý kompozit se i polotovar prepreg skládá z výztuže a matrice (pojiva). Výztuž tvoří v tomto případě předimpregnovaná vlákna. Podle materiálů pro výrobu vláken a matric rozeznáváme jednotlivé druhy prepregů, které se od sebe liší svými vlastnostmi.

Prepregy jsou ploché útvary a požadovaného tvaru a tloušťky vyráběné součásti docílíme kladením jednotlivých vrstev na sebe do forem, u reaktoplastických matric s následným vytvrzením za působení tepla a tlaku, u termoplastických bez vytvrzení.

Výhodou prepregů je, že součást vyrábíme již bez nutnosti složitého procesu prosycování výztuže pojivem. To znamená, že jsou prepregy většinou vyráběny ve firmách, které vlastní speciální zařízení pro jejich výrobu a poté dodávány do firem, které je dále zpracovávají na konkrétní součásti. Jak prepreg a součást z něho vyrobená mohou vypadat je na Obrázku 1.

[1], [2]



Obrázek 1 - Prepreg s uhlíkovými vlákny a příklad použití - interiérový díl automobilu [3], [4]

U vlastností prepregů, stejně tak jako obecně u kompozitů dochází k tzv. synergickému efektu. To znamená, že výsledný kompozit nemá vlastnosti tvořené pouze součtem vlastností matrice a vlastností výztuže, jak by mohlo být možná očekáváno.

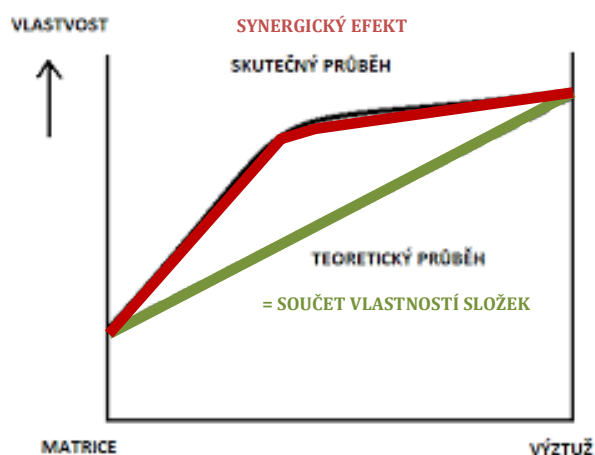
V případě jeho správné výroby je dosahováno lepších vlastností materiálu, než mají jeho samostatné složky a dosahuje se tzv. přidané hodnoty = synergického efektu.

[5]

Prepregy a obecně i kompozity lze rozdělit do dvou základních skupin podle:

- druhu výztuže,
- druhu matrice.

[6]



Obrázek 2 - Synergický efekt kompozitů [5]

3.1 Výhody a nevýhody prepregů

Jako každý materiál mají i prepregy své výhody a nevýhody. Mezi hlavní výhody patří:

- vysoká pevnost a tuhost,
- nízká hmotnost,
- vysoký podíl vláken,
- teplotní a korozní odolnost.

Některé prepregy mají výbornou odolnost proti ohni a zpomalují hoření. Dosahuje se vysoké úrovně estetických vlastností hotových výrobků, jejichž povrch je lesklý, hladký a je docíleno homogenních vlastností. Co se týče výroby dílů, tento proces je čistý, snadný, a s prepregy se dobře manipuluje.

Naopak nevýhodami prepregů jsou:

- vysoké náklady na výrobu,
- omezená životnost a skladovatelnost (prepregy s reaktoplastickou matricí),
- proces vytvrzení (prepregy s reaktoplastickou matricí).

Při špatné tvorbě nástřihového plánu však může vznikat větší množství odpadu, což je nežádoucí. Dalšími nevýhodami prepregů jsou vysoké náklady na výrobu.

Omezená životnost a skladovatelnost jsou největším úskalím prepregů s reaktoplastickou matricí, protože při pokojových teplotách dochází k samovolnému vytvrzování pryskyřice. Také se zhoršuje tvarovací schopnost a zvyšuje viskozita.

Prepregy s reaktivním reaktoplastickým pojivem se ukládají do mrazících zařízení s teplotou asi -20°C , aby proces vytvrzování do doby dalšího zpracování neprobíhal. Přibližně 6 hodin před dalším použitím se prepregy rozmrazí bez přístupu vzduchu, aby nenavlhly. To se netýká prepregů s termoplastickou matricí, jelikož u nich tento proces vůbec neprobíhá.

[2], [4], [5]

3.2 Oblasti použití prepregů

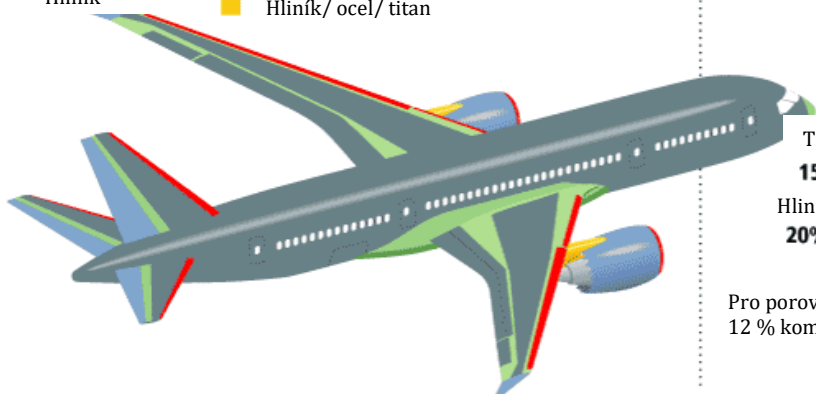
Výroba prepregů stále velmi finančně náročná, proto se používají nejčastěji v odvětví letectví a kosmonautiky. Příklady použití v této oblasti jsou výroba:

- klapek,
- radarových dómů (radomů),
- dveří,
- krytů přístrojů apod.

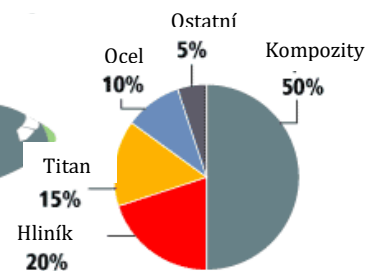
Jako příklad lze uvést letoun Boeing 787 Dreamliner, který je z 50 % vyroben z kompozitních materiálů, včetně trupu a křídel, které razantně snižují jeho celkovou hmotnost. Naproti tomu je u momentálně nejprodávanějšího Boeingu 777 použito pouze 12 % kompozitních materiálů. Konkrétní aplikace jednotlivých druhů kompozitů ukazují Obrázky 3 a 4.

Materiály použité u Boeingu 787

 Skelná výztuž	 Uhlíkový kompozit (laminát)
 Hliník	 Uhlíkový kompozit (sendvič)
	 Hliník/ ocel/ titan



Použité materiály (dle váhy)



Pro porovnání: u Boeingu 777 se používá 12 % kompozitů a 50 % hliníku

Obrázek 3 - Použití kompozitních materiálů u Boeingu 787 Dreamliner [49]

Další oblasti použití jsou:

- automobilový průmysl,
- kolejová vozidla,
- stavba lodí,
- větrná energetika,
- sportovní náčiní (lyže, surfy apod.) atd.

[1], [2], [6]



Obrázek 4 - Rám kola (vlevo) a helma (vpravo) z uhlíkového prepregu [7] [8]

3.3 Vývojové směry ve výrobě prepregů

Snahou je prepregy stále zdokonalovat co se týče výběru materiálu i výrobní technologie. V oblasti vláken se jedná o nové typy a vývoj nových textilních technologií. Co se týče polymerních matric, je snahou zvýšit jejich tepelnou odolnost. Perspektivní se jeví také kombinování kovů a polymerů.

Prepregy s reaktoplastickou matricí mají řadu nevýhod, jako je např. proces vytvrzování (sesítování), který u termoplastů neprobíhá. Vytvrzování je chemická reakce, tudíž zde mohou vznikat nežádoucí vedlejší zplodiny zatěžující životní prostředí a zdraví člověka. Přejít z reaktoplastické na termoplastickou matrici má samozřejmě svá úskalí, protože i termoplasty mají řadu svých nevýhod. Těmi hlavními v oblasti výroby kompozitních materiálů je jejich vysoká viskozita, jež má za následek nedokonalé a obtížné prosycování vláken.

Byla vynalezena technologie Twintex, jejímž principem je zahřátí a následné ochlazení hybridní tkaniny tvořené polymerními a zároveň např. skleněnými vlákny. Vlákna polymeru se při zahřátí roztaví a dojde ke spojení a prosycení skleněných vláken v kompaktní celek. Dalším perspektivním nápadem bylo také střídání prepregů s různými vlastnostmi při laminování. Hybridním materiálem unikátních vlastností je též polymer Glare, který je složen z tenkých vrstev kompozitu s polymerní matricí a skleněnými vlákny a tenkých vrstev hliníku. Další perspektiva je také ve výrobě prepregů a obecně kompozitů s přírodními vlákny, protože méně zatěžují životní prostředí.

Perspektivních úvah je celá řada, proto je jen otázkou času, které z nich budou v budoucnu zvoleny a zrealizovány.

[6]

4 VÝZTUŽE PRO POLYMERNÍ MATRICE

Vlákna sama o sobě se pro výrobu konstrukčních prvků téměř nepoužívají. Své užité vlastnosti uplatňují většinou až právě ve spojení s matricí ve formě kompozitních materiálů. V tomto případě jde o vlákna vyztužené polymery. Vlákna lze dělit podle:

- druhu materiálu, ze kterého se vyrábějí,
- tvaru,
- orientace.

[9]

Výztuž tvoří v kompozitech tzv. nespojitou fázi, matrice spojitou. Úkolem výztuže je už podle názvu samozřejmě vyztužení kompozitu. Očekává se zvýšení mechanických vlastností, anebo může ovlivňovat i jiné vlastnosti, které poté kompozit získá, např. vodivost.

[6]

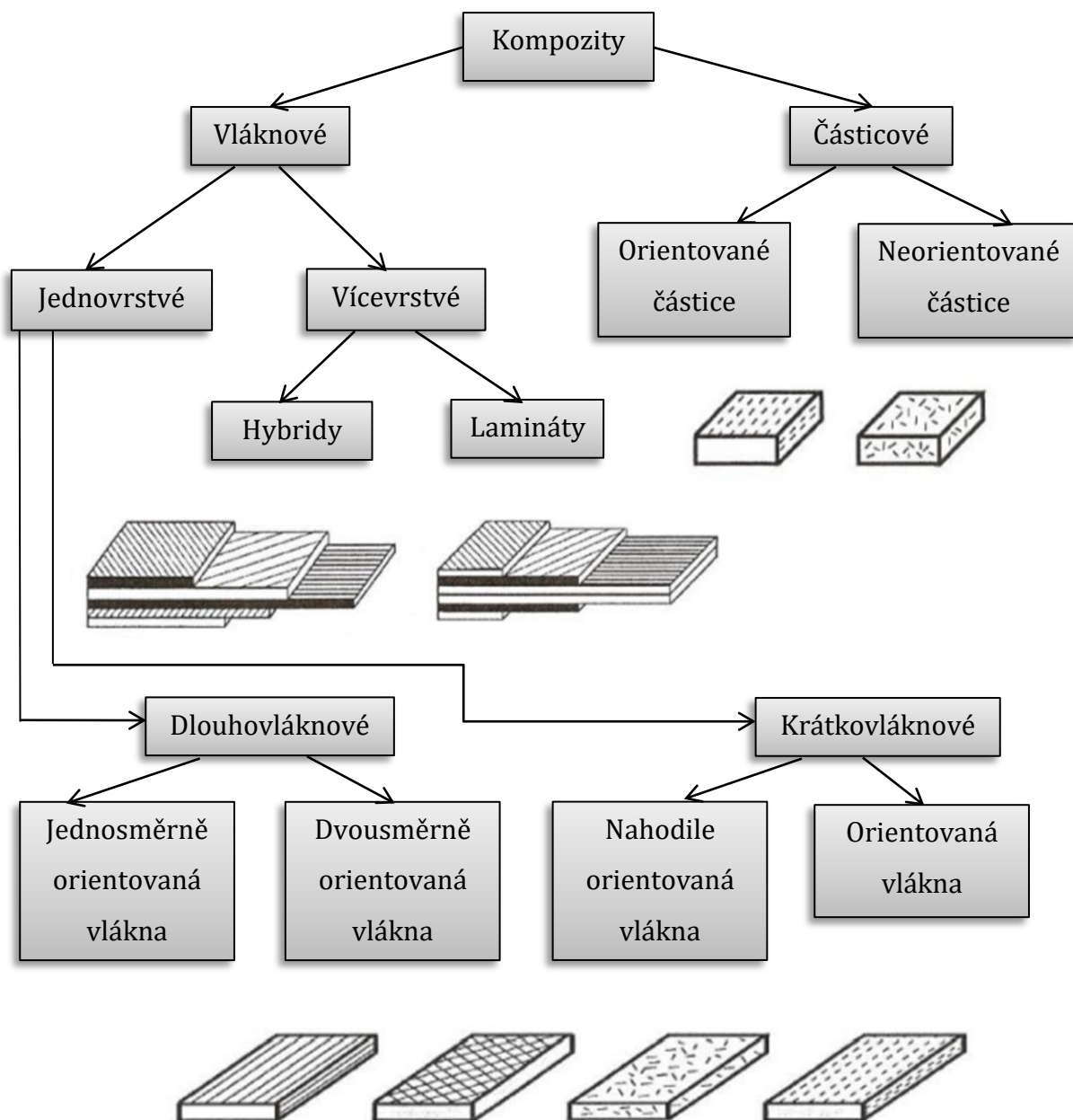
Důležitou roli pro výsledné vlastnosti kompozitu hraje také fázové rozhraní mezi výztuží a matricí, tzn. soudržnost mezi nimi. Na výztuž se napětí přenáší adhezí na její hranici s matricí. Adheze je závislá na přilnavosti matrice k výztuži. Vlákna musejí být matricí dobře smáčena. Smáčivost je udávána tzv. kontaktním úhlem.

[2]

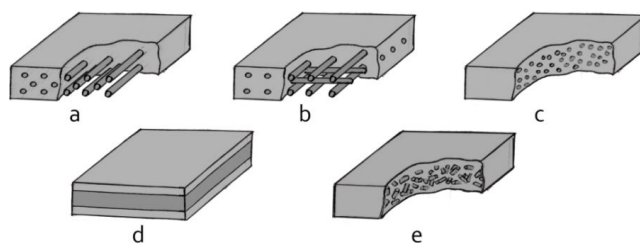
Obrázky 5 a 6 ukazují rozdělení kompozitních materiálů podle druhu výztuže (sekundární fáze):

- Částicové – náhodná orientace částic nebo přednostní orientace částic (např. uhlíkové destičky),
- Krátkovláknové – délka vláken je asi stonásobek jejich průměru s orientací náhodnou nebo přednostní,
- Dlouhovláknové – délka vláken je desítky až stovky mm s orientací náhodnou nebo přednostní (v ploše nebo prostoru), nebo kontinuální vlákna s orientací jednosměrnou, dvousměrnou nebo trojsměrnou, což jsou úplety a tkaniny,
- Hybridní – kombinace vláken z různých materiálů.

[6]



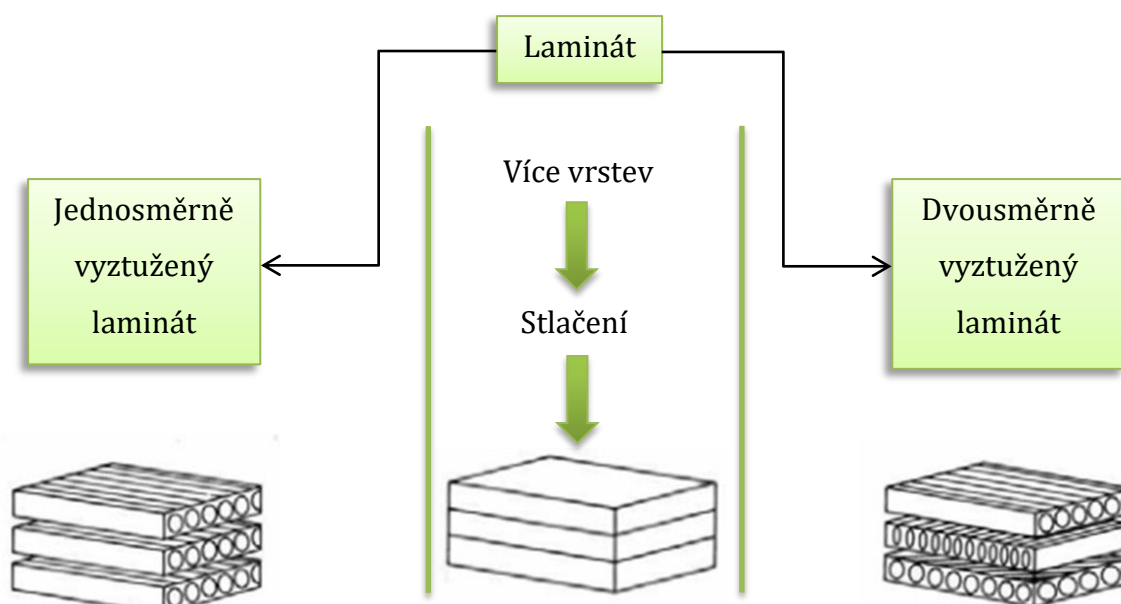
Obrázek 5 - Rozdělení kompozitů dle tvaru a orientace vláken [5]



Obrázek 6 - Kompozity s odlišnými typy výztuže: a) jednosměrně vyztužený dlouhovláknový kompozit, b) dvousměrně vyztužený dlouhovláknový kompozit (tkanina), c) částicový kompozit, d) vrstvený kompozit, e) krátkovláknou kompozit s nahodilou orientací vláken [10]

4.1 Lamináty

Pokud je kompozit složen z více vrstev, které jsou pevně spojeny v jeden celek, nazývá se laminát a jednotlivé vrstvy laminy. Jednotlivé vrstvy mohou mít různou orientaci a cíleně se tak dají upravovat vlastnosti laminátu. Pokud je laminát vytvořen z vrstev odlišných materiálů nebo z kombinace částicové a dlouhovláknové výztuže, jedná se o tzv. hybrid. Vlastnosti hybridního laminátu jsou opět dány vlastnostmi jednotlivých lamin. Druhy laminátů ukazuje Obrázek 7.



Obrázek 7 - Laminát - princip výroby a jeho druhy [11]

Při výrobě vznikají důsledkem teplotních změn zbytková vnitřní pnutí. Ta mohou mít někdy za následek až porušení celistvosti laminátu. Pnutí mohou způsobovat rozdílné teplotní délkové roztažnosti materiálů matrice a výztuže, anebo jednotlivých lamin ve směru vláken a kolmo na ně.

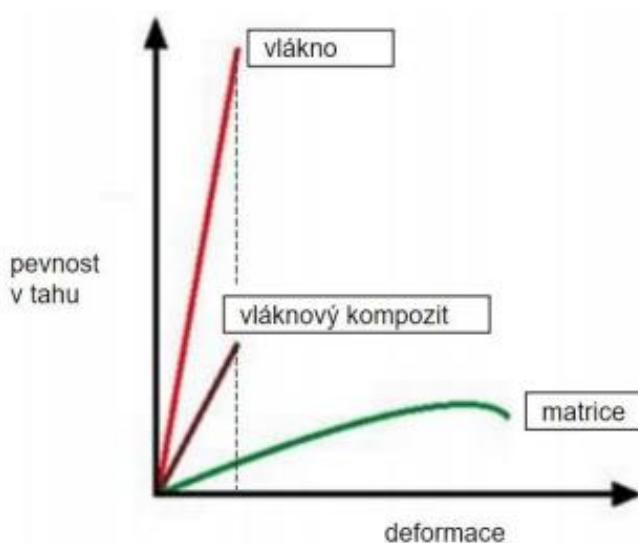
[2], [9]

4.2 Vyztužující účinek vláken

Podmínky vyztužujícího účinku vláken (Obrázek 8):

- vlákna musejí být pevnější než matrice,
- vlákna musejí mít vyšší tuhost než matrice,
- vlákna se musejí porušit později, než matrice.

[2]



Obrázek 8 - Tahový diagram [12]

4.3 Druhy vazeb tkanin

Vlákna bývají pro výrobu prepregů nejčastěji používána ve formě tkanin. Tkanina se skládá z vláken nebo pramenců (svazek vláken), které jsou pravidelně uloženy v útku a osnově (viz. Obrázek 11). Působení sil je dvousměrné, kvůli pravoúhlému uspořádání do dvou směrů. Křížení vláken může mít různou podobu a označuje se jako vazba. Rozlišujeme různé druhy vazeb (Obrázek 9):

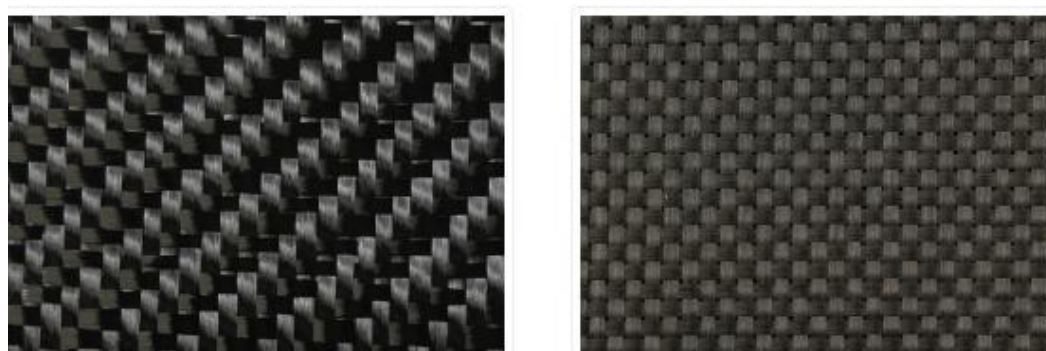
- plátňová - základní jednoduchá vazba,
- saténová (atlasová) - malé vychýlení (zvlnění) vláken oproti vazbě keprové, hladký povrch,
- keprová - vyšší pevnost a tuhost než plátňová vazba, ohybná, vhodná pro tvarové prvky.

Na Obrázku 10 vidíme tkaninu z uhlíkových vláken v keprové a plátňové vazbě.

[2]



Obrázek 9 - Druhy vazeb; zleva: plátňová, saténová (atlasová) a keprová vazba [13]



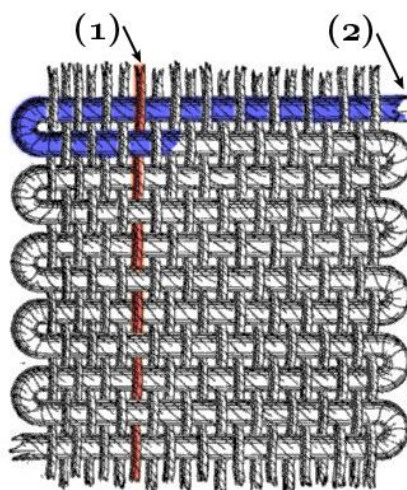
Obrázek 10 - Uhlíková tkanina - keprová vazba (vlevo), plátňová vazba (vpravo) [14]

4.4 Typy tkanin

Tkaniny se podle skladby vláken v osnově a útku (Obrázek 11) dělí na:

- jednosměrné tkaniny,
- hybridní tkaniny,
- trojrozměrné (multiaxiální) tkaniny.

[2], [13]



Obrázek 11 - Schéma tkaniny; (1) - osnova, (2) - útek [15]

Jednosměrné tkaniny se používají pro aplikace, kde je namáhání jednosměrné, např. lyže. Hybridní tkaniny mají v osnově a útku různé druhy vláken, takže dochází k jejich kombinaci (Obrázek 12).

[2]



Obrázek 12 - Hybridní tkanina z uhlíkových a kevlarových vláken (keprová vazba) [14]

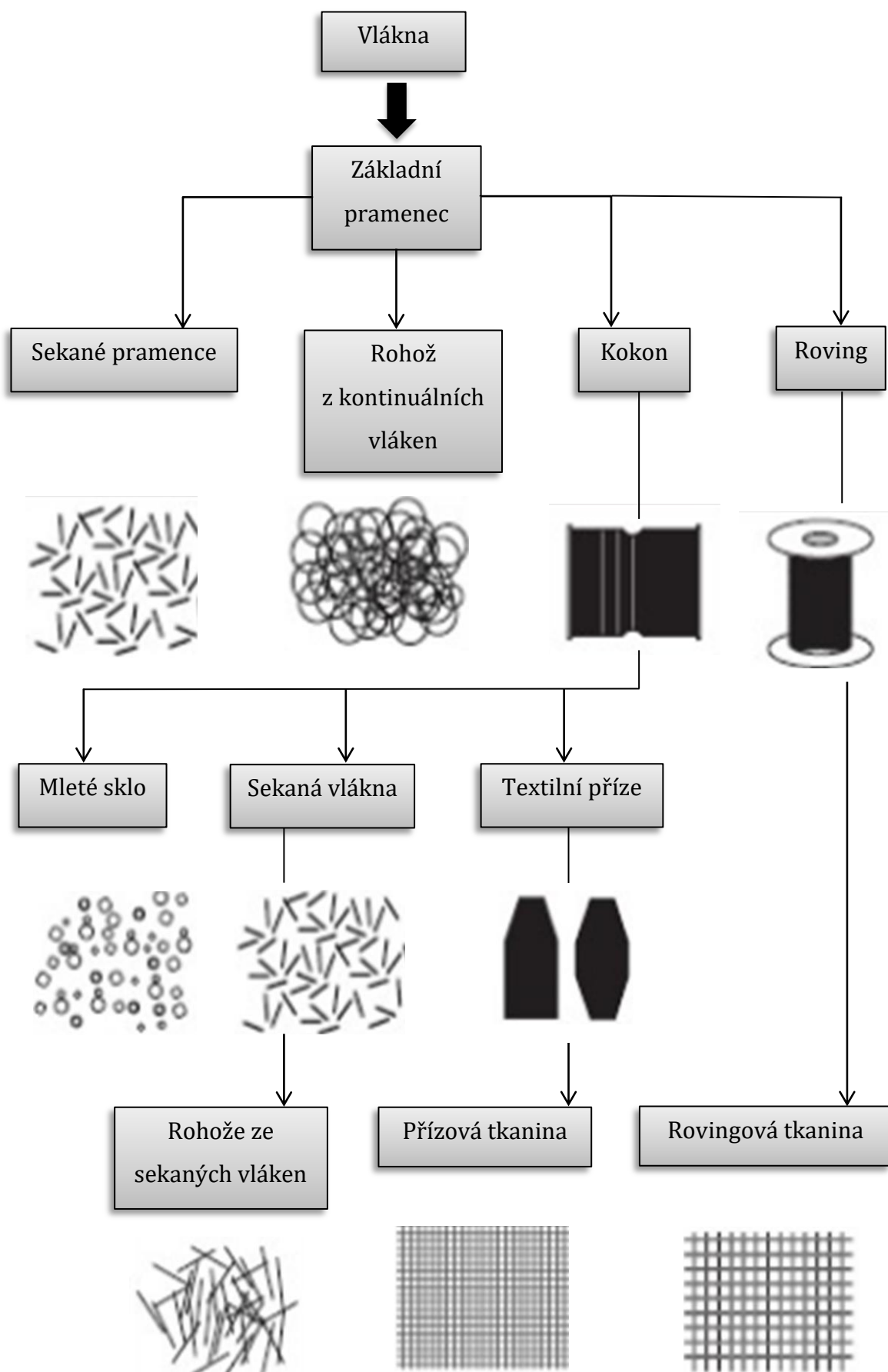
4.5 Dodávané formy vláken

Obecně se vlákna pro výrobu kompozitů dodávají ve formě (Obrázek 13):

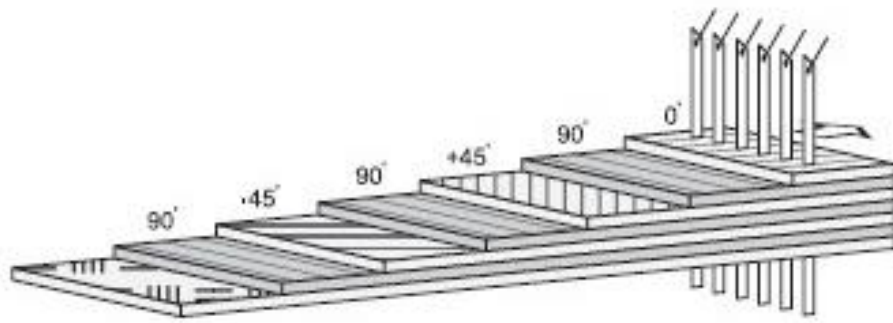
- krátkých vláken,
- přízí,

- nití (tканé příze),
- pramenců (rovingů),
- spředených rovingů,
- rohoží:
 - ze sekaných pramenců
 - z kontinuálních vláken
 - závojevých (povrchových)
- tkanin:
 - jednosměrných
 - hybridních
 - trojrozměrných (multiaxiálních) (Obrázek 14)
- úpletů
- pletenin
- jednosměrných pásů.

[2]



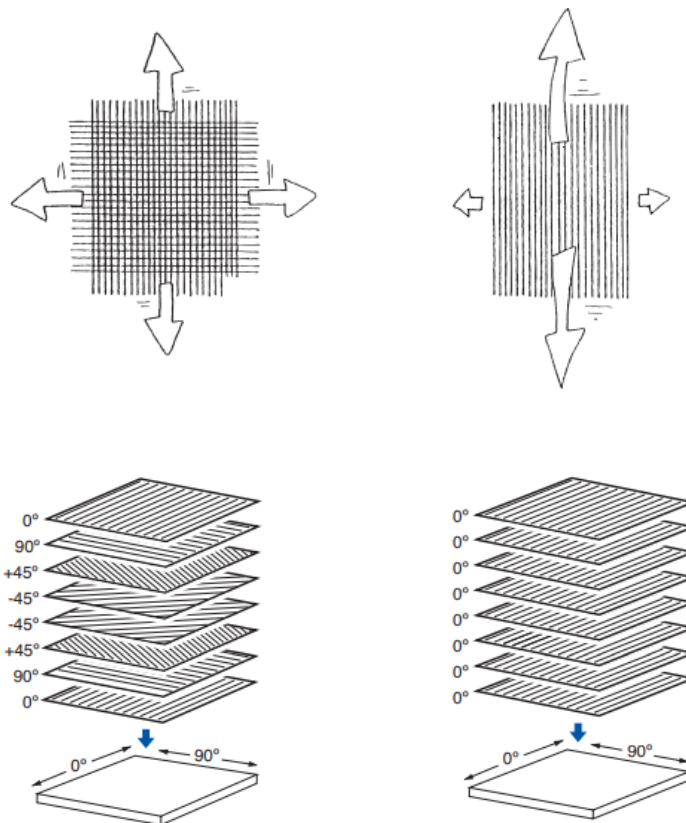
Obrázek 13 - Dodávané formy vláken [16]



Obrázek 14 - Prošívání multiaxiálních tkanin [13]

Jednosměrně vyztužené kompozity jsou anizotropní a mechanické vlastnosti jsou soustředěny do jednoho směru. Naopak kompozity, kde je výztuží tkanina jsou vyztužené ve dvou směrech. Oba případy vyztužení vidíme na Obrázku 15.

[2], [9]



Obrázek 15 - Tkanina - vyztužení ve dvou směrech (vlevo) a jednosměrná výztuže (vpravo) [13]

4.6 Materiály výztuže pro polymerní matrice

Ve strojírenství mají pro výrobu kompozitů s termoplastickou matricí momentálně největší uplatnění vlákna uhlíková, skleněná a aramidová. Používají se samozřejmě také i další druhy materiálů. Na Obrázku 16 jsou vyobrazeny tkaniny z různých materiálů.

[6]

Tabulka 2 porovnává hodnoty mechanických vlastností různých materiálů vláken. V první tabulce (Tabulka 1) je pro představu uvedeno také porovnání s běžně používanými konstrukčními kovy.

Tabulka 1 - Porovnání E - modulů v tahu vybraných kovů a vláken [17]

Materiál	E - modul [GPa]
Ocel	210
Hliník	76
Titan	116
Skleněné vlákno	72
Uhlíkové vlákno	295
Vysokomodulové uhlíkové vlákno	830
Kevlarové vlákno	135

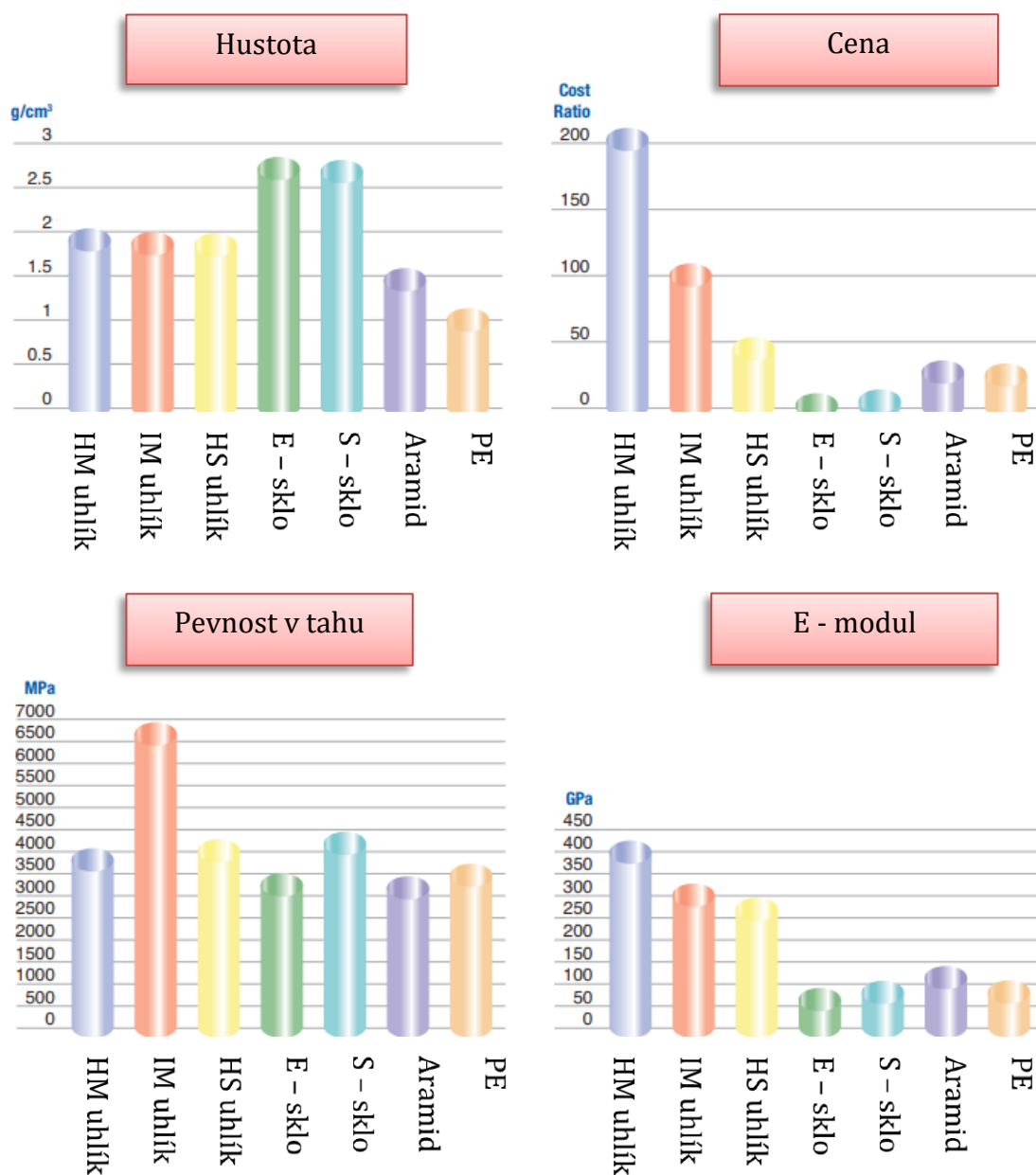
Tabulka 2 - Vlastnosti v odlišném směru vybraných vláken [17]

Materiál vlákna	E_{\parallel} [kN.mm ⁻²]	E_{\perp} [kN.mm ⁻²]	$G_{\parallel\perp}$ [kN.mm ⁻²]	$\nu_{\parallel\perp}$	$E_{\parallel} : E_{\perp}$
E - sklo	73	73	30	0,25	1
Aramidové vysokomodulové (HM)	133	5,4	12	0,38	24,6
Uhlíkové standardní (HT)	240	15	10	0,28	16
Uhlíkové vysokomodulové (HM)	500	5,7	8	0,36	88



Obrázek 16 – Tkaniny z různých materiálů – zleva nahoře: skleněná tkanina (plátnová vazba) [18], uhlíková tkanina (keprová vazba) [14], aramidová tkanina (keprová vazba) [19], kevlarová tkanina (keprová vazba) [20], tkanina z juty (plátnová vazba) [21], čedičová tkanina (plátnová vazba)

V grafu (Obrázek 17) jsou uvedeny hodnoty pro čtyři kritéria vybraných materiálů vláken. Vidíme, že největší hustotu má E sklo, nejnižší naopak polyethylen. Nejdražší jsou vysokomodulová uhlíková vlákna, nejlevnější skleněná typu E. Nejvyšší pevnosti v tahu dosahují vlákna uhlíková, nejnižší aramidová a skleněná typu E. Nejvyšší Youngův modul pružnosti v tahu (E- modul) vykazují vysokomodulová uhlíková vlákna a naopak nejnižší mají vlákna skleněná.



Obrázek 17 - Porovnání hodnot hustoty, ceny, pevnosti v tahu a E - modulu vláken z různých materiálů [13]

4.6.1 Skleněná vlákna (Glass Fibers)

Skleněná vlákna jsou textilní vlákna o průměru 3,5 až 24 μm , mající pravidelný kruhový průřez. Vyrábějí se tažením z roztavené skloviny z trysek. Rozeznáváme více druhů sklovin (Tabulka 3) a to:

- E - sklovina,
- S - sklovina,
- R - sklovina,
- T - sklovina,
- AR - sklovina,
- C - sklovina.

Jednotlivé typy sklovin se od sebe liší svým složením a vlastnostmi, tudíž i oblastí použití jednotlivých vláken. Skleněná vlákna mají amorfní strukturu, která stojí za jejich izotropními vlastnostmi. Silná kovalentní vazba mezi křemíkem a kyslíkem zvyšuje pevnost vláken a jejich modul pružnosti v tahu E.

Použití je nejčastěji ve formě příze, tkané příze, pramenců a rohoží. Pro reaktoplastické matrice se jako sklovláknité výztuže používají nejčastěji:

- pramence (rovingy),
- rohože,
- tkaniny z pramenců,
- tkaniny z vláken.

Pro termoplastické matrice se používají nejčastěji:

- krátká vlákna (délka cca 0,22 mm),
- dlouhá vlákna (délka cca 5 mm).

[2]

Tabulka 3 - Vlastnosti jednotlivých typů neupravených skleněných vláken [2]

Vlastnost	E	R nebo S	C	E C R	AR
Hustota [g.cm ⁻³]	2,6	2,53	2,52	2,72	2,68
Mez pevnosti v tahu [MPa]	3 400	4 400	2 400	3 440	3 000
E - modul [MPa]	73 000	86 000	70 000	73 000	73 000
Poměrné prodloužení při přetržení [%]	<4,8	<4,6	<4,8	<4,8	<4,4
Součinitel teplotní roztažnosti [K ⁻¹]	5,0 x 10 ⁻⁶	4,0 x 10 ⁻⁶	6,3 x 10 ⁻⁶	5,9 x 10 ⁻⁶	6,5 x 10 ⁻⁶
Teplota měknutí [°C]	850	980	750	880	770

4.6.2 Uhlíková vlákna (Carbon Fibers)

Uhlíková vlákna jsou extrémně pevná a tuhá. Vysoké hodnoty pevnosti a modulu pružnosti E si uchovávají až do přibližně 500°C. Pevnost a hodnota modulu E jsou závislé na orientaci uhlíkových vrstev a také na výskytu vadných míst způsobených výrobou. Vyznačují se tzv. progresivním deformačním chováním, což znamená, že při zvyšujícím se zatížení stoupá hodnota modulu E. Vlákna mají nízkou měrnou hmotnost. Jsou extrémně korozně odolná a dobře vedou teplo i elektrický proud. Mají však nízkou tažnost a jsou hořlavá, při vyztužení kompozitu těmito vlákny je však hoření pomalé. Jsou odolnější proti dlouhodobému dynamickému zatěžování dokonce více, než ocel a hliník. Také jsou silně anizotropní, což má vliv i na teplotní roztažnost, která je v každém směru jiná a může dokonce nabývat v rovnoběžném směru vláken záporných hodnot. Záření vlákny prochází, takže neodrážejí radarový paprsek. Lidská tkáň je dobře přijímá, používají se proto i na tělní implantáty, např. kyčelní klouby.

Pro výrobu se používají dva postupy a výchozími surovinami jsou celulóza, smola a polyakrylonitril (PAN). Vlákna se vyrábějí o průměru 5 až 10 μm a z více než 90% jsou tvořena uhlíkem. Dalšími prvky, které se mohou v uhlíkových vláknech vyskytovat, jsou dusík, kyslík a vodík.

Uhlíková vlákna (Tabulka 4) se dělí na:

- HT – s vysokou pevností,

- HST – vysoce pevná s nižší tuhostí, ale vyšší tažností,
- IM – středněmodulová,
- LM – nízkomodulová
- HM - vysokomodulová

[2]

Tabulka 4 - Vlastnosti uhlíkových vláken [2]

Typ vlákn	Hustota [g.cm ⁻³]	Pevnost v tahu [MPa]	E [MPa]	E _⊥ [MPa]	Tažnost [%]	α [K ⁻¹]	α _⊥ [K ⁻¹]
HM1	1,96	1 750	500 000	5 700	0,35	-1,5	15
HM2	1,80	3 000	300 000	-	1,0	-1,2	12
HT	1,78	3 600	240 000	15 000	1,5	-1	10
HST	1,75	5 000	240 000	-	2,1	-1	10
IM	1,77	4 700	295 000	-	1,6	-1,2	12

4.6.3 Polymerní vlákna (Polymeric Fibers)

Polymerní vlákna jsou syntetická. Jsou vyrobená z polymerů mající schopnost vlákna tvořit, protože tomu tak není u všech. Jsou to např. PP, PA 6, PA 66 a PET. Naráz lze vytvořit desítky až stovky vláken. Vlákna se vyrábějí z roztoku nebo taveniny a vznikají protlačováním drobnými otvory trysek. Zvláknění probíhá mokřým nebo suchým procesem. Příčinou vysoké pevnosti a tuhosti polymerních vláken je jejich molekulární struktura (tvar makromolekul vazebné síly apod.).

[2]

4.6.3.1 Aramidová vlákna (Aramid Fiber)

Aramidová vlákna jsou na bázi lineárních organických polymerů a mají vysokou pevnost a tuhost. Výraz aramid vznikl ze slovního spojení aromatický polyamid. Vysoká tuhost je zapříčiněna aromatickými jádry v řetězci. Mezi řetězci jsou silné kovalentní vazby a molekuly spojují vodíkové můstky. Struktura je velmi hustě uspořádána. Jedná se o nejlehčí vyztužující vlákna, která jsou silně anizotropní. Stejně jako vlákna uhlíková

mají i aramidová záporný součinitel teplotní délkové roztažnosti, takže se při působení vyšších teplot smršťují. Ztrácejí svou pevnost, jsou-li exponována v záření (např. v UV záření). Jsou hydrofilní, tudíž absorbují vodu a výztuž musí být před spojením s matricí vysušena, jelikož vlhkost by způsobila jejich špatné propojení.

Používají se hlavně pro výrobu lehkých konstrukcí namáhaných na tah, nikoli však na tlak nebo ohyb. Sama o sobě nejsou vlákna příliš odolná působení vysokých teplot, jimi vyztužený kompozit se však hodí i pro výrobu protipožárních ochranných obleků. Pro vyztužování plastů se aramidová vlákna v celkovém výrobním objemu používají jen v malém procentu, jinak se používají např. jako náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, výztuž pneumatik a v balistice pro jejich schopnost absorbovat energii letící kulky. Aramidová vlákna se dají zpracovávat se všemi druhy termoplastů a reaktivních pryskyřic. Spřádají se z 20 % roztoku v koncentrované kyselině sírové, protože je není možné vyrábět přímo z taveniny. V Tabulce 5 jsou uvedené vlastnosti různých typů aramidových vláken.

[2]

Tabulka 5 - Vlastnosti různých druhů aramidových vláken [2]

Druh aramidů	Hustota [g.cm ⁻³]	Průměr [μm]	E – modul v tahu [MPa]	R _m [MPa]	Tažnost [%]
Vysokotažný	1,45	12	80 000	3 600	4,0
Vysoce tuhý	1,45	12	131 000	3 800	2,8
Ultratuhý	1,45	12	186 000	3 400	2,0

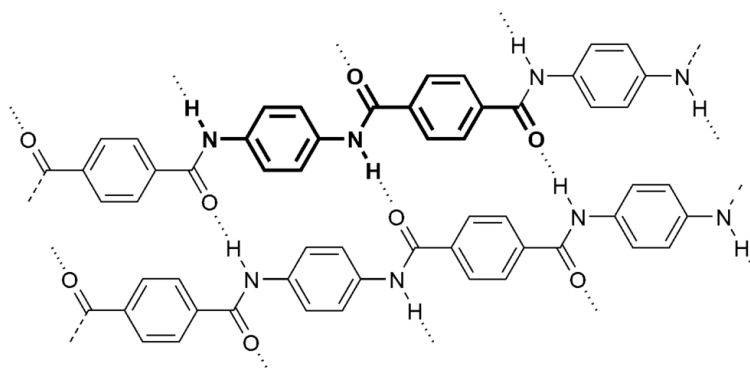
4.6.3.2 Kevlarová vlákna

Kevlar je obchodní název americké firmy pro para – aramidové vlákno (Obrázek 18), jež zde bylo prvně vyrobeno.

Tato vlákna vynikají svou vysokou pevností a extrémní teplotní odolností. Svou pružnost a pevnost si zachovává i při kryogenních teplotách. Hlavní nevýhodou kevlaru je jeho degradace při působení UV záření a jeho navlhavost. Je dražší než většina ostatních vláken až o jeden řád.

Kevlar má 4x vyšší absorpci rázové energie než obyčejné polyamidy, proto se používá i pro výrobu vojenské výbroje, kde hrozí zásah střelou.

[22], [23]



Obrázek 18 - Struktura para - amidu [22]

Vlákna se vyrábí navíjením z kapalného roztoku. Používá se např. na výrobu:

- výztuže do pneumatik,
- lan (mosty),
- oděvů pro vojáky a motosport,
- neprůstřelných vest a helem,
- speciálních rukavic odolných proti pořezání,
- výztuže do kompozitů (letectví a kosmonautika, sportovní náčiní, automobilový průmysl) atd. [24]

Vedle kevlaru je známý také polymer twaron, jež vyrábí konkurenční firma. Nejznámějšími typy kevlaru jsou kevlar 29 a kevlar 49. Jejich vlastnosti spolu s dalšími typy kevlaru, twaronu a pro porovnání i polyamidu nylonu uvádí Tabulka 6. [22]

Tabulka 6 - Mechanické a fyzikální vlastnosti kevlaru v porovnání s twaronem a nylonem [9]

Materiál	Hustota [kg.dm ⁻³]	R _m [MPa]	E [GPa]	A [%]
Kevlar 29	1,44	3 450	58,6	4
Kevlar 49	1,44	3 620	124	2,5
Kevlar 149	1,45	2 410	146	1,5

Twaron	1,44	3 000	67	3,3
Twaron HM	1,45	3000	125	2,3
PA (nylon)	1,14	800	1,2	-

4.6.4 Přírodní vlákna

Pro výrobu kompozitů s polymerní matricí se z přírodních materiálů nejvíce osvědčila vlákna rostlinná, konkrétně len, bavlna, konopí, juta a další. Vlákna mají nízkou měrnou hmotnost a hodí se proto pro lehké konstrukce. Jsou odolná proti stárnutí, ale jsou náchylná k působení vlhkosti. Výhodou je, že se dají likvidovat spalováním oproti vláknům z jiných materiálů. Nehodí se pro zpracovatelské teploty vyšší než 200°C. Mají omezenou délku a jejich kvalita je závislá na podmínkách růstu a na možném biologickém napadení výchozích surovin apod. Úprava vláken před spojením s matricí je nákladná. Mechanické vlastnosti různých druhů přírodních vláken uvádí Tabulka 7.

[2]

Tabulka 7 - Vlastnosti přírodních vláken [2]

Vlastnost	Konopí	Len	Juta	Sisal
E - modul [MPa]	70 000	30 000	55 000	20 000
Mez pevnosti v tahu [MPa]	600	750	550	600
Tažnost [%]	1,6	2,0	2,0	2,0
Hustota [g.cm ⁻³]	1,45	1,48	1,4	1,45

4.6.5 Čedičová vlákna (Basalt Fibers)

Pro výrobu čedičových vláken je výchozí surovinou čedičová hornina. Hlavní složkou je oxid křemičitý SiO₂. Další obsahové prvky jsou uvedeny v Tabulce 8. Tavné zvláknování probíhá při teplotách okolo 1 600°C a následně se materiál ochlazuje. Podle rychlosti ochlazení vzniká různá struktura sklovité hmoty. Vlákna jsou velmi ohebná. Podobají se skleněným vláknům typu S, jejich cena je však nižší. Čedičová vlákna se dodávají ve formě rovingů, tkanin plátnové a keprové vazby, sekaných vláken a hybridních přízí.

Kompozity vyztužené těmito vlákny se používají:

- ve stavebnictví (díly mostů, vozovek a železnic, omítkové systémy, geotextilie, armovací tkaniny, plniva do tmelů, tepelně – izolační směsi, atd.),
- radarová zařízení,
- brzdové destičky,
- filtry v chemickém průmyslu,
- stěny obrněných vozidel,
- k výrobě některých sportovních náčiní, jako např. vodní lyže a surfy, atd.

Dále je výroba směřována na ochranné obleky odolné ohni a působení chemikálií. Ty jsou poté vhodné pro svářeče, hasiče nebo třeba pracovníky galvanovny a chemického průmyslu. Rozsah použití vláken je od -200°C do 700°C .

Hlavními výhodami čedičových vláken jsou:

- dobrá tepelná odolnost,
- nehořlavost,
- rozsah použitelnosti ve velkém teplotním intervalu,
- dobrá chemická odolnost,
- malá nasákavost,
- nízká tepelná vodivost,
- odolnost proti UV záření,
- odolnost proti erozi,
- vysoký elektrický odpor,
- velká zvuková pohltivost,
- odolnost proti mikroorganismům,
- nižší zátěž pro životní prostředí při výrobě a likvidaci (náhrada azbestových a skleněných vláken),
- recyklace,
- menší zdravotní rizika při výrobě a použití.

Tabulka 9 ukazuje vlastnosti čedičových vláken v porovnání se skleněnými.

[25]

Tabulka 8 - Přibližné složení čedičového vlákna [26]

Složka	Obsah složky [hm. %]
SiO ₂	52,8
Al ₂ O ₃	17,5
CaO	8,59
MgO	4,63
Fe ₂ O ₃	10,3
Na ₂ O	3,34
TiO ₂	1,38
Ostatní prvky	1,46

Tabulka 9 - Vlastnosti čedičových vláken v porovnání se skleněnými [25]

Vlastnost	Čedičové vlákno	Skleněné vlákno
Hustota [kg.m ⁻³]	2 900	2 600
Navlhavost [%]	0,5	0,1
E - modul [MPa]	100 000	70 000
Pevnost v tahu [MPa]	1 850 až 2 150	1 850 až 2 150
Pevnost v tlaku [MPa]	300	300
Pracovní teplota [°C]	-200 až 700	-60 až 460
Měrná tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,027 až 0,033	0,029 až 0,035
Elektrický odpor [W.m]	10 ¹²	10 ¹¹

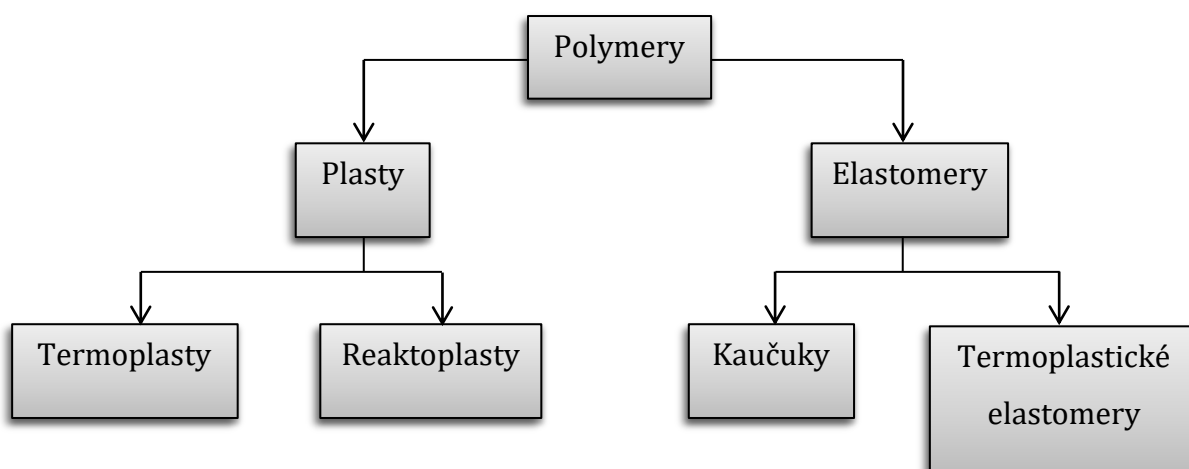
5 POLYMERNÍ MATRICE

Matrice je spojitá fáze, která spojuje sekundární nespojitou fázi (výztuž) v celek, má tedy funkci pojiva. Zabráňuje spojitému šíření trhliny a chrání výztuž před účinky okolního prostředí. Adheze mezi výztuží a matricí umožňuje přenos namáhání. Materiál matrice také ovlivňuje teplotu použití kompozitu, únavu a dává výrobku požadovaný tvar.

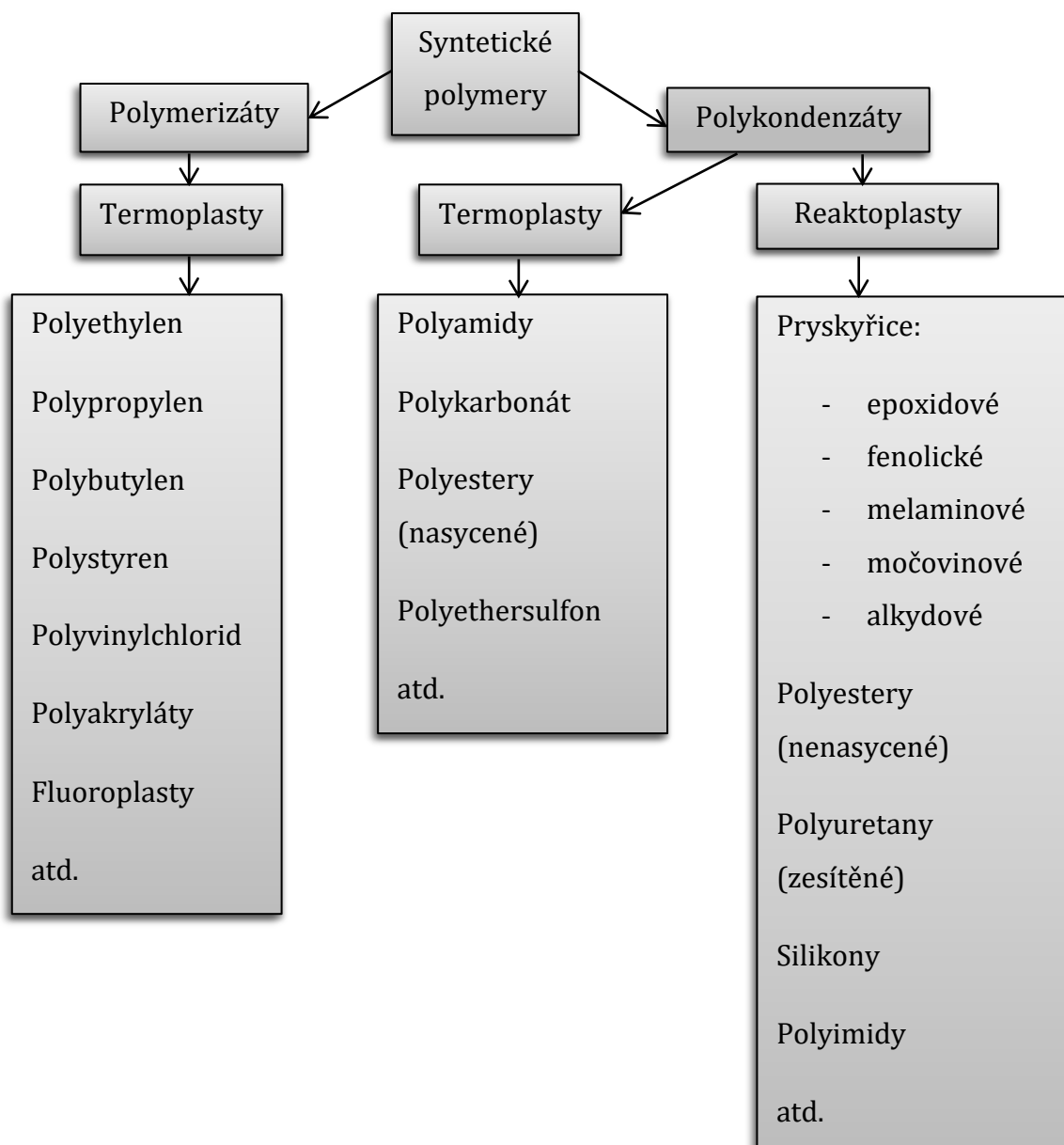
[6]

Jak bylo již zmíněno, polymerní matrice prepregů může být buď reaktoplastická nebo termoplastická. Vlákná jsou u prepregů s reaktoplastickou matricí napuštěna (předimpregnována) nejčastěji syntetickými pryskyřicemi. Vzniklý celek je částečně vytvrzen. Termoplasty mají oproti reaktoplastům více viskozitní taveninu, která zapříčiňuje řadu problémů, především horší prosycování vláken matricí.

Další text bude zaměřen hlavně na matrice termoplastické, jelikož jsou hlavním tématem této práce. Matrice reaktoplastické nebudou podrobně rozepsány. Na Obrázku 19 je obecné rozdělení polymerních materiálů, na Obrázku 20 polymerů syntetických.



Obrázek 19 - Základní rozdělení polymerů [27]



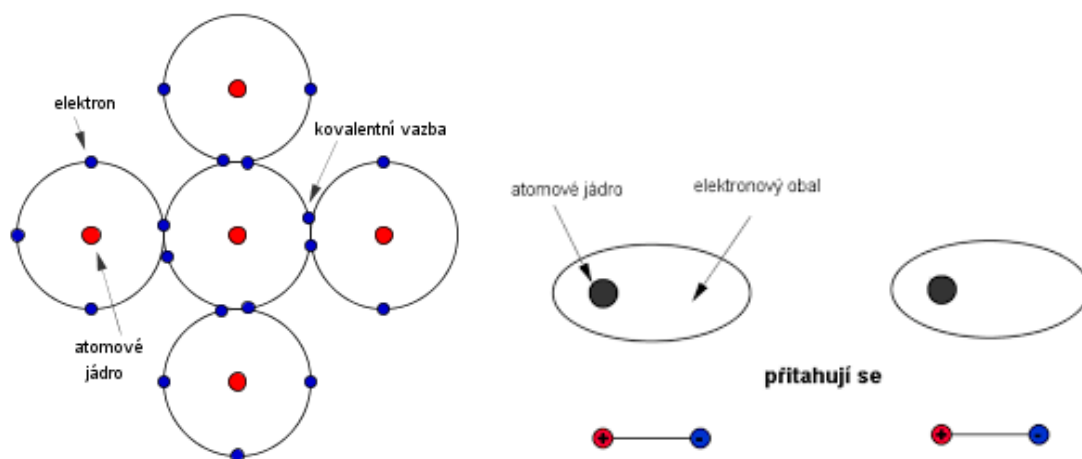
Obrázek 20 - Obecné rozdělení syntetických polymerů [28]

5.1 Vazby v polymerech

V polymerech existují tři typy vazeb. Hlavním typem je vazba kovalentní, jejíž princip je založen na sdílení elektronů mezi dvěma atomy. Orbitály jsou tak vždy společné pro dva atomy.

Dalším typem je vazba van der Waalsova. Vyskytuje se mezi molekulami složenými z kovalentně vázaných atomů. Uplatňuje se dipólová přitažlivost částic.

Oba typy vazeb vidíme na Obrázku 21.



Obrázek 21 - Kovalentní vazba (vlevo) a Van der Waalova vazba (vpravo) [29]

Třetím typem je vazba vodíková více známá jako vodíkové můstky. Vodíkový atom zprostředkovává přitahování dvou elektronegativních atomů. Mění se meziatomové vzdálenosti tvořené vodíkovou vazbou.

[9]

5.2 Příspěvy v polymerech

Příspěvy se do polymerních materiálů přidávají za účelem modifikovat jejich chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Hlavními přísadami jsou:

- změkčovadla,
- stabilizátory,
- plniva,
- retardéry hoření (retardanty),
- barviva.

[9]

5.3 Termoplastické matrice

Termoplastická matrice je oproti reaktoplastické houževnatější. Velkou výhodou prepregů s termoplastickou maticí je jejich neomezená doba skladovatelnosti, která

také nevyžaduje ke skladování mrazící zařízení, protože zde neprobíhá proces vytvrzení, jako tomu je u reaktivních pryskyřic reaktoplastických matric. Celý proces zpracování je proto také mnohem kratší. Termoplastická matrice umožňuje tepelné dotvarování a spojování svařováním, jelikož mohou být tato polymery vícenásobně taveny. To souvisí i se snadnější recyklací. U matric z termoplastů PPS, PEEK a PEI jsou možné vysokoteplotní aplikace, protože mají tyto polymery vysoké teploty skelných přechodů a tavení.

Oproti prepregům s reaktoplastickou matricí mají však nižší modul pružnosti v tahu, menší pevnost v tlaku a vyšší sklon ke creepu zejména při zvýšených teplotách. Vlákna jsou obtížněji prosycována matricí, protože má při zpracování vysokou viskozitu a někdy dochází pouze k obtečení vláken. Je potřeba vyšších tlaků a teplot při zpracování a také má povrch prepregů menší přilnavost, což je klíčové pro povrchové úpravy, jako jsou např. nátěry. Porovnání hodnot mechanických vlastností kompozitu s termoplastickou a reaktoplastickou matricí je v Tabulce 10.

[2]

Tabulka 10 - Typické vlastnosti kompozitu s uhlíkovou výztuží s termoplastickou nebo reaktoplastickou matricí (v e směru vláken) [17]

Vlastnost	Epoxid	PPS	PEEK	Polyimid (PEI)	PA
Objemový podíl uhlíkových vláken [V_f]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Pevnost v tahu [GPa]	1,9	2,3	2,5	1,9	2,4
Pevnost v ohybu [GPa]	1,7	1,2	1,5	1,5	1,2
Modul pevnosti v ohybu [GPa]	130	130	130	130	125
Pevnost v tlaku [GPa]	1,3	0,95	1,0	1,0	1,0

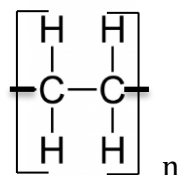
5.3.1 Používané termoplasty

5.3.1.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen je měkký a houževnatý polymer. Jeho strukturní jednotku můžeme vidět na Obrázku 22. Je teplotně odolný od -60 do 90°C. Chemicky je odolný kyselinám, zásadám rozpouštědlům i olejům. Je to výborný vysokofrekvenční izolátor.

Vyrábí se z něj nádoby, lahve, víčka, folie na obaly, hadice, těsnění, vodovodní trubky, potrubní spojky, kbelíky, kanystry a armatury.

[30]



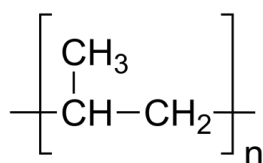
Obrázek 22 - Polyethylen [31]

5.3.1.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen (Obrázek 23) je pevný, tuhý a houževnatý plast, jež je odolný až do 130°C. Pod -10°C křehne. Vlastnosti jsou jinak velmi podobné PE.

Používá se na výrobu potrubí a jeho součástí pro horkou vodu, tělesa čerpadel, sterilizované injekční stříkačky a na přepravky na potraviny a lahve.

[30]



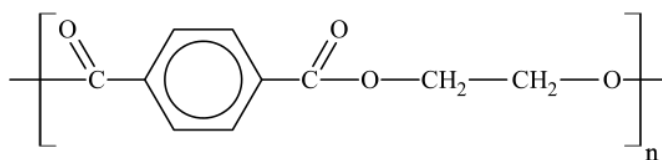
Obrázek 23 - Polypropylen [32]

5.3.1.3 Polyethylentereftalát (PET)

Polyethylentereftalát (Obrázek 24) špatně krystaluje a může být dodáván v podobě amorfni i semikrystalické. Jeho předností jsou velmi dobré mechanické a kluzné vlastnosti. Za běžných podmínek je křehký. Má dobrou creepovou odolnost a je navlhavý.

Vyrábějí se z něj vlákna pro textilní účely a výrobu lan. Dále vlákna vyztužující kompozity. Nejznámější je však PET pro své použití pro nápojové lahve a fólie.

[30]



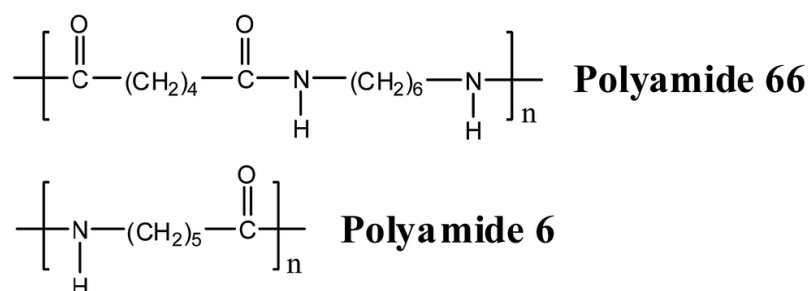
Obrázek 24 - Polyethyltereftalát [33]

5.3.1.4 Polyamid (PA)

Polyamidy (Obrázek 25) jsou obecně pevné, tuhé a proti opotřebení odolné plasty. PA 66 je jejich nejznámější zástupce. Tlumí rázy, chvění a má dobré elektroizolační vlastnosti. Chemicky je odolný proti olejům, rozpouštědlům a slabým zásadám, ale neodolává kyselinám. Teplotně je odolný do 80°C. PA jsou polární plasty a jsou náchylné na creep. Mají dobré kluzné vlastnosti.

Jsou vhodné pro výztuže kompozitních materiálů. Dalším použitím jsou výroba ozubených kol a ložisek, řemenice, filtry apod.

[30]



Obrázek 25 - Polyamid 66 a Polyamid 6 [34]

Výše popsané polymery jsou v praxi běžně používané samozřejmě nejen pro matrice polymerních kompozitů. Pro ty se však používají i další druhy plastů. Jejich typy a vlastnosti jsou uvedené v následujících tabulkách (Tabulka 11 až 14).

Tabulka 11 - Vlastnosti vybraných termoplastů používaných pro matrice kompozitů [35]

Název	Značka	E - modul v tahu [MPa]	R _m [MPa]	Hustota [kg.m ⁻³]
Polyetylen	PE	200 - 1 400	8 - 35	14 - 960
Polypropylen	PP	1 100 - 1 300	21 - 37	900 - 907
Polyethylentereftalát	PET	3 100	50 - 80	1 370
Polyamid 6	PA 6	1 200 - 1 400	70 - 80	1 130
Polyamid 66	PA 66	1 600 - 2 000	77 - 84	1 140
Polyfenylsulfid	PPS	3 300 - 3 400	48 - 86	1 340
Polyetheretherketon	PEEK	2 250	70 - 103	1 320

Tabulka 12 - Přehled dalších termoplastů používaných pro matrice kompozitů a jejich značení [35]

Název	Značka
Polyamid 12	PA 12
Polyamid 46	PA 46
Polysulfon	PSU
Polyfenylsulfon	PPSU
Polyethersulfon	PES
Polyftalamid	PPA
Polyetherimid	PEI
Polyamidoimid	PAI
Polyetherketonketon	PEKK
Termoplastický polyimid	PI

Tabulka 13 – Další vlastnosti vybraných termoplastů používaných pro matrice kompozitů [35]

Název	Značka	Semikrystalický / amorfní	Teplota tání [°C]	Teplota skelného přechodu [°C]
Polyetylen	PE	S	120 až 137	-110 až -122
Polypropylen	PP	S	176	-24
Polyethylentereftalát	PET	S	334	-
Polyamid 6	PA 6	S	220	40
Polyamid 12	PA 12	S	175	20
Polyamid 46	PA 46	S	295	75
Polyamid 66	PA 66	S	265	65
Polysulfon	PSU	A	190	-
Polyfenylsulfon	PPSU	A	220	-
Polyethersulfon	PES	A	230	-
Polyfenylsulfid	PPS	S	185 až 290	88
Polyftalamid	PPA	S	312	127
Polyetherimid	PEI	A	217	-
Polyamidoimid	PAI	A	280	-
Polyetheretherketon	PEEK	S	288	185
Polyetherketonketon	PEKK	S	140	380
Termoplastický polyimid	PI	A	265	-

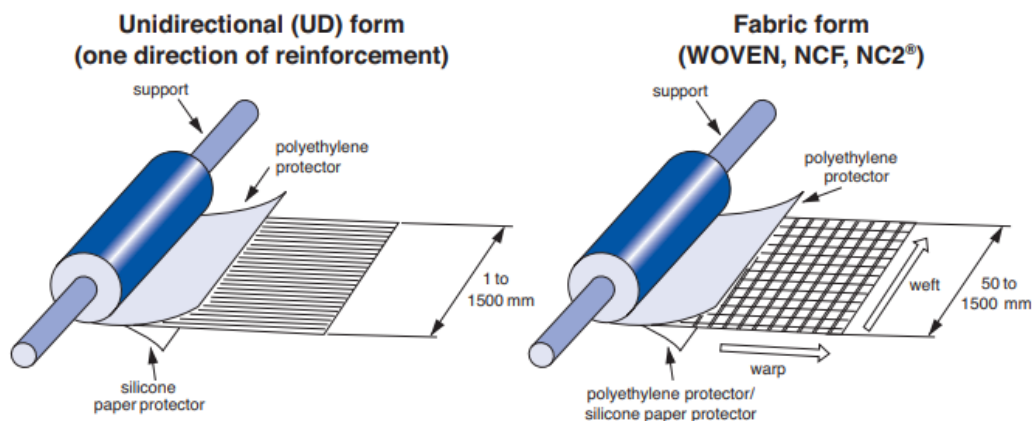
Tabulka 14 – Příklady navhlových (polárních) a nenavhlových (nepolárních) polymerů a hodnoty jejich nasákavosti za uvedených podmínek [35]

Název	Značka	Polární	Nepolární	Nasákavost (H ₂ O, 23°C, 24 hod) [%]
Polyetylen	PE	-	ano	<0,01
Polypropylen	PP	-	ano	0,01 – 0,003
Polyethylentereftalát	PET	ano	-	0,3
Polyamid 6	PA 6	ano	-	1,3 – 1,9
Polyamid 66	PA 66	ano	-	1,0 – 2,8
Polyfenylsulfid	PPS	ano	-	0,1 – 0,07
Polyetheretherketon	PEEK	ano	-	0,1 – 0,14

6 METODY VÝROBY PREPREGŮ

V knižních a internetových zdrojích se lze často setkat s odlišným pojetím metod výroby prepregů. Část literatury pojednává obecně o dělení metod výroby kompozitních materiálů, část o výrobních metodách, kdy je polotovarem prepreg a nejmenší část přímo o výrobě prepregů s reaktoplastickou matricí. Výroba prepregů s termoplastickou matricí není k dohledání téměř vůbec. Velká část zdrojů kombinuje tato rozdělení dohromady a vzniká tak dezinformovanost a chaos v oblasti tohoto tématu a je obtížné se správně zorientovat. Firmy si navíc střeží svá výrobní tajemství a nerozšiřují příliš mnoho detailních technických parametrů mezi širokou veřejností.

Výroba prepregů je jednou z mnoha metod výroby kompozitů. Výztuží jsou vlákna (jednosměrně vyztužený prepreg) nebo tkanina (dvousměrně vyztužený prepreg) (Obrázek 26). Jednosměrně vyztužené prepregy mají tloušťku 0,1 až 0,15 mm a dvousměrně vyztužené jsou charakterizovány podle textilní vazby rovingů a plošné hmotnosti tkaniny.



Obrázek 26 - Výroba jednosměrně vyztuženého prepregu (vlevo) a dvousměrně vyztuženého tkaninou (vpravo) [13]

Důležité je, že prepreg je sice kompozitní materiál, ale nejedná se ještě o kompozitní díl. Musíme proto odlišovat metody výroby samotných prepregů, které se mohou dále lišit podle druhu polymerní matrice. U reaktoplastických matric proběhne při výrobě prepregu její částečné vytvrzení a u finální výroby dílu vytvrzení úplné. U termoplastických matric vytvrzovací reakce neprobíhá vůbec. Následuje dělení

výrobních metod, kdy vzniká již finální výrobek a používají se zde jako polotovary již zhotovené prepregy.

Obecně ke spojování výztuže a termoplastické matrice existuje více technologií. Jsou to:

- prosycování výztuže pomocí roztoku polymerů,
- prosycování výztuže pomocí mletých polymerů,
- prosycování výztuže pomocí roztoku předpolymerů,
- lisování folií,
- vytlačování (extruze),
- protlačování (pultruze).

Prosycování výztuže pomocí roztoku polymerů, což se používá spíše výjimečně, protože k mnoha polymerům neexistují vhodná rozpouštědla. Dále je možné vlákna prosycovat pomocí mletých polymerů nebo předpolymerů, avšak obě záležitosti jsou velmi nákladné a zatím spíše ve stavu vývoje. Dalšími technologiemi jsou lisování folií, vytlačování (extruze) a protlačování (pultruze), kdy se polymerní matrice (folie) zalisovává mezi vlákna. Dochází ale ke špatné prostorové tvarovatelnosti prepregů, vlivem tuhosti matrice za zpracovatelské teploty, kdy nedojde k dostatečnému prosycení vláken polymerní matricí.

[2]

Následující rozdělení vychází z dostupných zdrojů a vlastního pochopení autora. Bude se zabývat pouze rozdělením výrobních metod prepregů.

6.1 Metody výroby prepregů s polymerní matricí

Metody výroby prepregů s termoplastickou matricí procházejí teprve vývojem. Jsou ale obdobné jako metody výroby prepregů s reaktoplastickými matricemi.

Mezi nejznámější a nejpoužívanější metody patří Impregnace pomocí rozpouštědla (Solvent Impregnation) a Tavení za tepla (Hot Melt Proces). Ruční výroba se hodí spíše pro malosériovou a prototypovou výrobu. Prášková metoda (powder scattering) se hodí spíše pro termoplastické matrice, ale nebyla zatím rozšířena pro průmyslovou výrobu a

metoda není příliš známá. Metody blíže popisuje následující text a znázorňují obrázky.
[36]

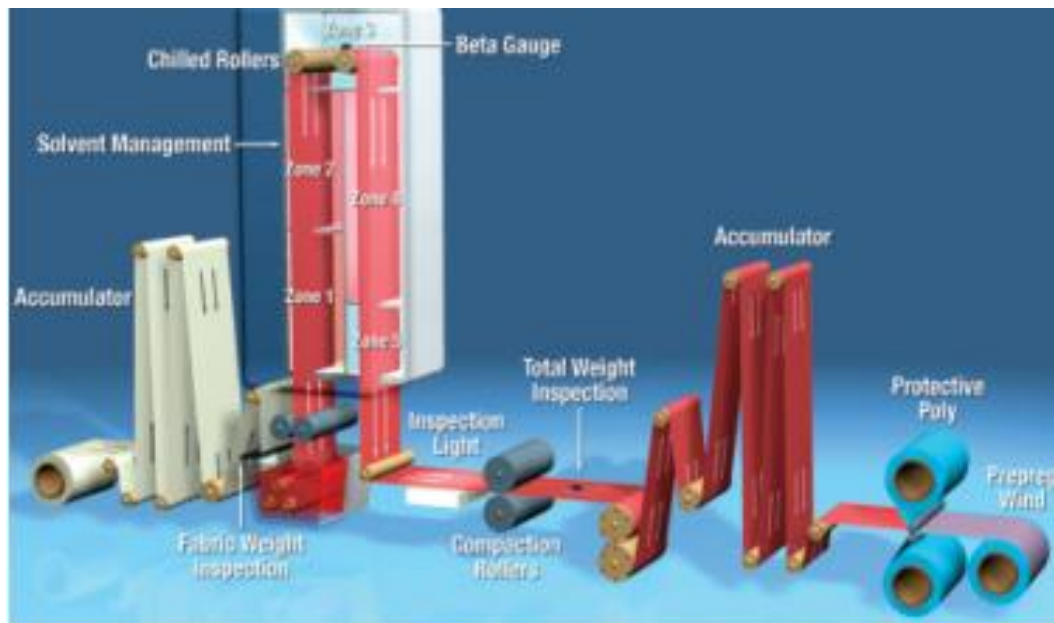
6.1.1 Ruční kladení (ruční laminace)

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší výrobní metodu. Spočívá v ručním kladení vrstev výztuže a polymerního prášku, který po roztavení tvoří matici. Za působení tepla a tlaku (např. na lisu) se matrice roztaví a nasytí vyztužující vlákna. Metoda není samozřejmě vhodná pro velkosériovou výrobu.

6.1.2 Impregnace pomocí rozpouštědla (Solvent Impregnation/ Solvent Dip Process)

Některé polymery jsou dobře rozpustné v rozpouštědlech a právě toho tato metoda využívá. Pryskyřice se rozpustí v lázni rozpouštědla a do lázně se ponoří výztuž, která se prosytí. V sušící peci se rozpouštědlo odpaří. Impregnaci pomocí rozpouštědla ukazuje Obrázek 27.

[38]



Obrázek 27 - Impregnace pomocí rozpouštědla (Solvent Impregnation) [13]

Vertikální impregnovací linka LI 300 firmy Mikrosam je vysoce výkonná a slouží pro výrobu prepregů (Obrázek 28).

Technické parametry:

- šířka tkaniny: 300 – 2 000 mm
- hmotnost tkaniny: 20 – 600 g.m⁻²
- pracovní teplota: 80 – 250°C
- rychlost zpracování: až 20 m.min⁻¹.

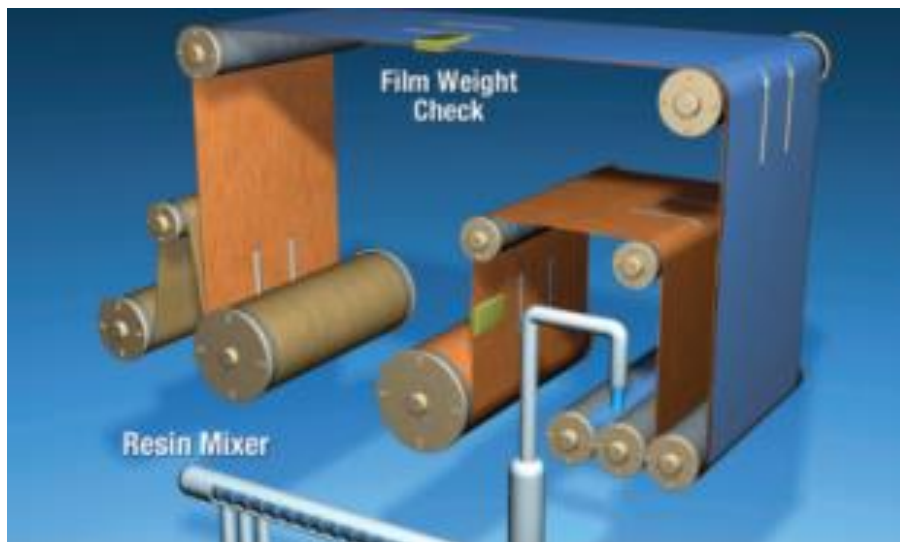
[37]



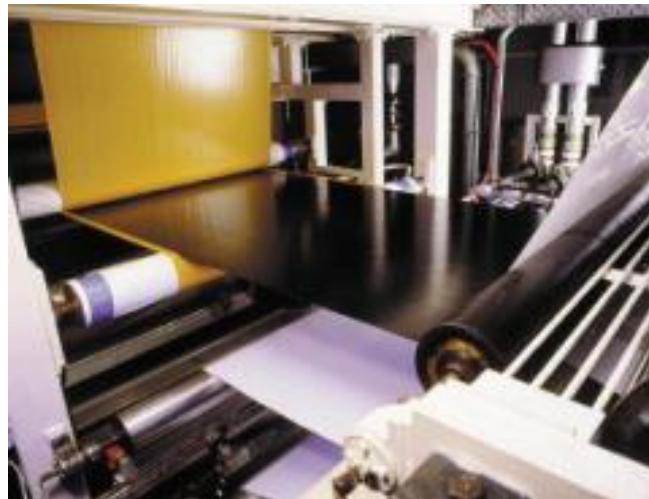
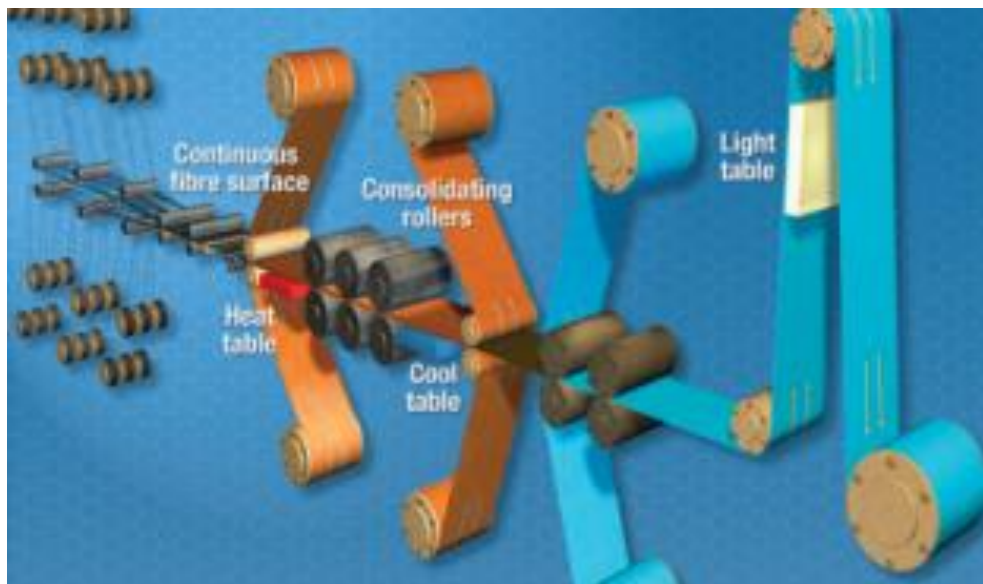
Obrázek 28 - LI 300 vertikální impregnovací linka firmy Mikrosam [37]

6.1.3 Tavení za tepla (Hot Melt Proces)

Proces tavení za tepla má dva kroky. Prvním krokem je nanesení tenké vrstvy polymeru na papírový substrát (Obrázek 29). Druhý krok spočívá v impregnaci výztuže za působení tepla a tlaku (Obrázek 30). Zhotovený prepreg je nakonec navinut na jádro. [38]



Obrázek 29 - Tavení za tepla - krok 1 [13]



Obrázek 30 - Tavení za tepla - krok 2 [13]

Linka PLS-250-2F od firmy Mikrosam (Obrázek 31) slouží pro výrobu prepregů procesem tavení za tepla.

Technické parametry:

- šířka tkaniny: až 1 500 mm
- pracovní teplota: 40 – 250°C
- rychlost zpracování: až 5 m.min⁻¹
- chladící médium: voda
- topné médium: olej.

[37]



Obrázek 31 - Linka PLS-250-2F firmy Mikrosam [37]

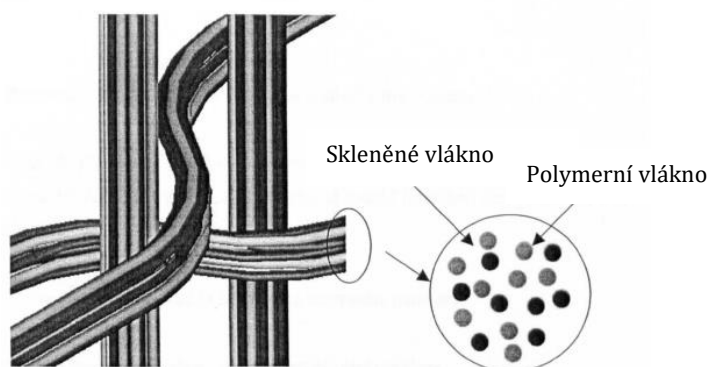
6.1.4 Prokládání vyztužujících vláken matričními

Tato metoda spočívá v mísení vláken odlišných materiálů. Vznikají tzv. hybridní tkaniny, Jedná se vždy o vlákna z vyztužujícího materiálu a o vlákna polymerní, která později vytvoří kompozitní matici. K tomu dojde po zahřátí vláken, kdy se polymerní roztaví a dojde k prosycení vyztužujících vláken polymerem.

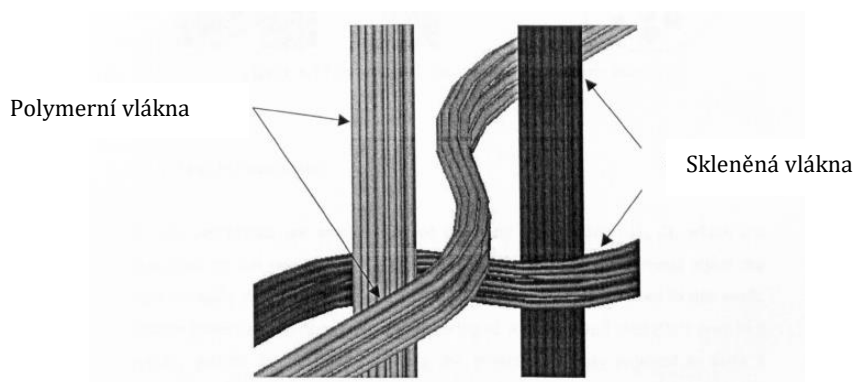
Nejznámějšími postupy jsou commingling (Obrázek 32), kdy se mísí různá termoplastová a vyztužující vlákna a coweaving (Obrázek 33), kdy se tato vlákna společně tkají. Útek tvoří vlákna vyztužující a osnovu termoplastová. Dalšími postupy

jsou cowrapping (opřádání) a cospinning (spřádání). Po zahřátí dojde k natavení plastových vláken, která prosytí vlákna vyztužující a vznikne tak kompozit již bez přidání dalších přísad. Používané technologické postupy jsou lisování, navíjení a další.

[2], [39]



Obrázek 32 - Commingling skleněných a polymerních vláken [39]



Obrázek 33 - Coweaving skleněných a polymerních vláken [39]

6.1.5 Prášková metoda (powder scattering)

Rozptylování polymerního prášku (Obrázek 34) je možné pro mnoho druhů polymerních materiálů, jak reaktoplastů, tak termoplastů. Prášek prochází přes rozprašovací válec. Dochází k jeho rovnoměrnému rozptylování na výztuž. K roztavení prášku může někdy docházet až při konečné výrobě dílu (např. při lisování). Na Obrázku 35 je stroj od firmy Reliant Machinery a na Obrázku 36 výrobní linka.

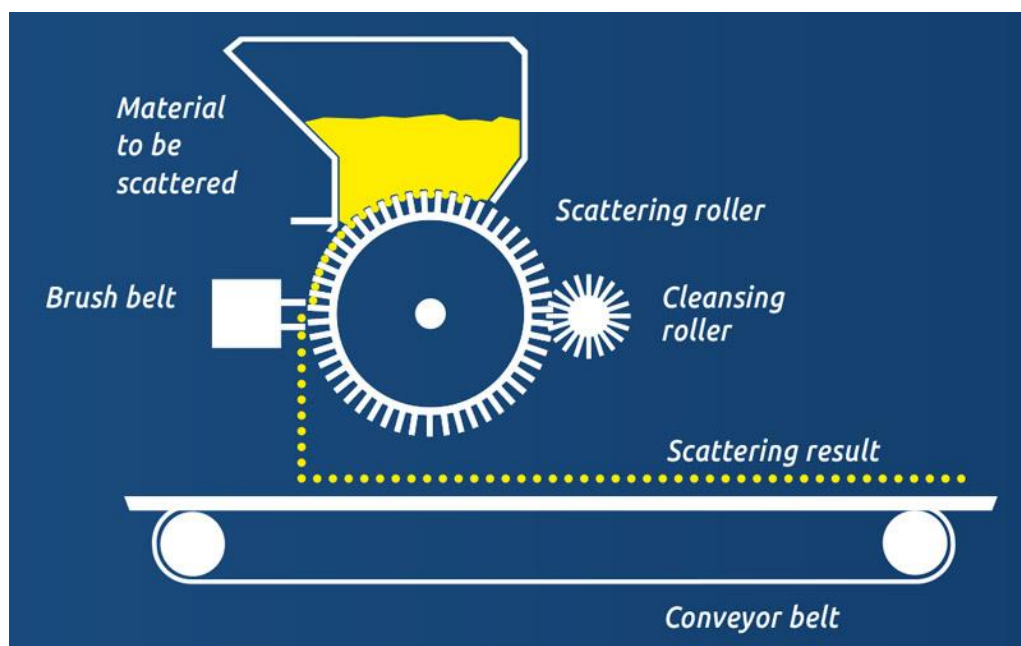
Technické parametry (firma Schott &Meissner):

pracovní šířka: max. 5 000 mm

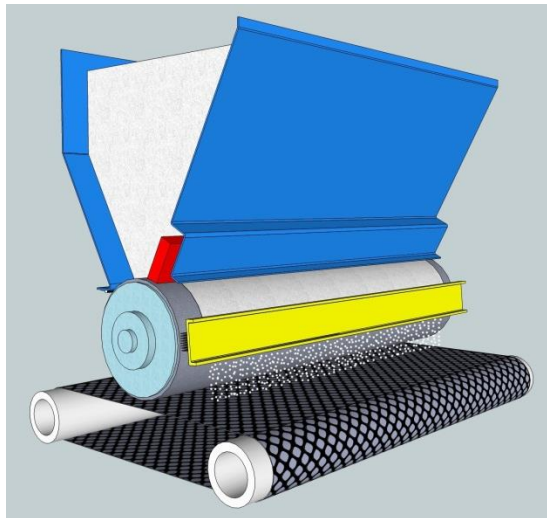
velikost zrn: 100 – 600 μm

množství rozptýleného prášku: 5 – 25 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$.

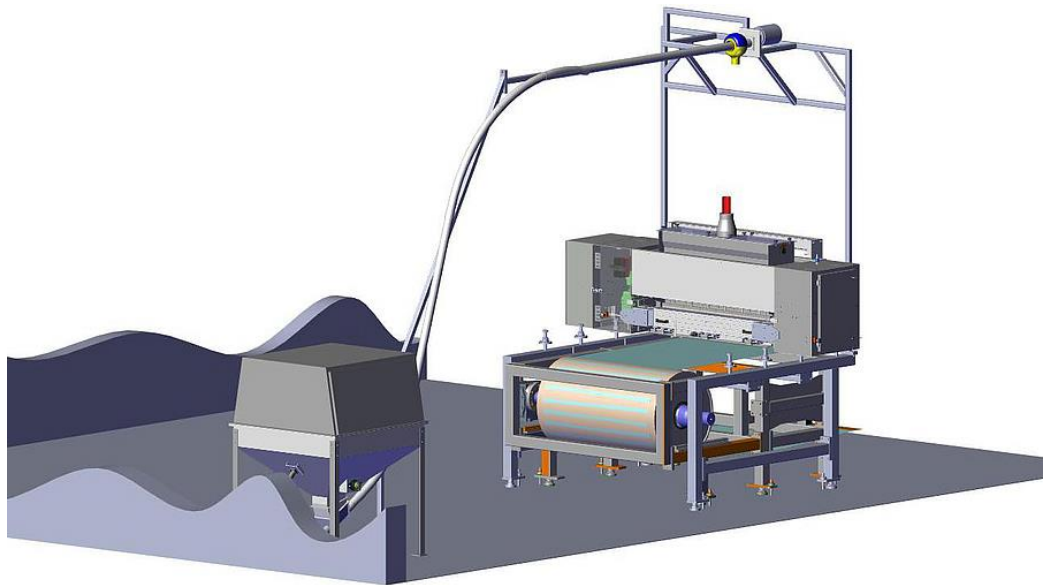
[40], [41]



Obrázek 34 - Prášková metoda (powder scattering) [42]



Obrázek 35 - Stroj pro práškovou metodu (powder scattering) [41]



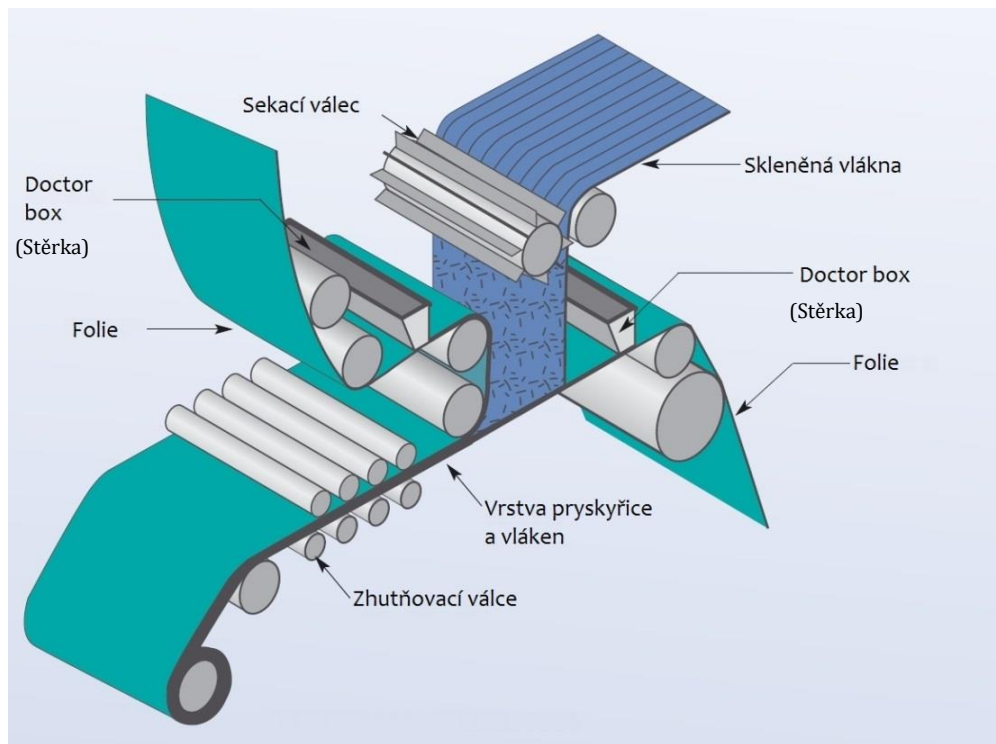
Obrázek 36 - Linka pro práškovou metodu [40]

6.1.6 SMC materiály (Sheet Moulding Compound)

Sheet Moulding Compound (Obrázek 37) nepatří mezi klasické metody výroby prepregů. Výroba polotovarů a jejich následné zpracování ve výsledný díl jsou však velmi podobné. Při této metodě jsou skelná vlákna sekána a spojována s polymerní matricí v jeden celek. Kompozit je ve formě plátů, které se na sebe dále vrství a v lisu za působení tepla a tlaku vytvarují do požadované součásti. U reaktoplastických matric proběhne vytvrzovací reakce.

Pryskyřice se nejprve v tenké vrstvě nanese na plastovou fólii. Na ní se rovnoměrně nanesou sekaná vlákna. Další fólie s vrstvou pryskyřice je nanesena na druhou stranu první se sekanými skelnými vlákny a průchodem mezi válci dojde k prosycení vláken a zhutnění kompozitu. Poté se materiál může navinout na cívku nebo nasekat do bloků. Materiál má omezenou skladovatelnost danou použitím reaktivních pryskyřic. Délka vláken bývá 25 až 50 mm. Pro zlepšení procesu se přidávají ještě různé přísady, jako např. separátory apod.

[43]



Obrázek 37 – SMC (Sheet Moulding Compound) [43]

6.1.7 Společnosti vyrábějící prepregy

Ve světě se zabývají výrobou prepregů zejména firmy:

- Hexcel
- TenCate Advanced Composites
- Prepreg-ACM CJSC
- SGL Group
- Axiom Materials.

[38]

7 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

U prepregů a obecně kompozitních materiálů hraje velkou roli u jejich chování při mechanickém zatěžování výztuž, její orientace a hlavně velikost obsahu vláken v matrici. Porušení má mnohem složitější povahu, než je tomu u homogenních materiálů. Druh zatížení vede ke vzniku trhlin určitého typu.

[2]

Typy zkoušek mechanických vlastností kompozitních materiálů jsou obdobné, jako u ostatních materiálů. Jedná se například o zkoušku rázem v ohybu, tahem a tříbodovým ohybem atd. Vedle těchto obvykle používaných zkoušek stojí další, specifické pro daný typ materiálu a vzorku.

V následujícím textu je blíže popsána T – zkouška v odlupování lepených sestav z ohebných adherendů, zkouška tříbodovým ohybem, zkouška rázem v ohybu a zkouška tahem.

Zkouška odlupování lepených sestav z ohebných adherendů, jak již její název napovídá, není klasickou zkouškou pro testování kompozitních materiálů, ale používá se pro lepené spoje. Norma pro obdobnou zkoušku určenou přímo pro testování kompozitních materiálů nebyla dohledána. Norma pro tuto zkoušku byla proto použita pouze jako inspirace k vytvoření vzorků a průběhu testování. Proto je v dalším textu (v praktické části práce) toto testování označeno pouze jako T – zkouška.

V experimentální části byla kromě T- zkoušky provedena ještě zkouška tříbodovým ohybem. Zkoušky jsou dále blíže popsány v praktické části práce.

7.1 T – zkouška v odlupování lepených sestav z ohebných adherendů

Norma ČSN EN ISO 11 339, srpen 2010

Při popisu této zkoušky je vycházeno z normy ČSN EN ISO 11339 vydané v srpnu roku 2010.

Norma pojednává o průběhu odlupového testu, konkrétně o odlupové pevnosti, síle odlupování a jejím měření, o přípravě vzorků a použitých zařízeních. Vymezuje i další používané pojmy.

Zkušební vzorky mají předepsaný rozměr 25 x 200 mm. Jsou tvořeny ze dvou slepených částí, jejichž konce by měly zůstat volné v délce 50 mm, aby se daly upnout do čelistí trhačického stroje.

Zkouška spočívá v upnutí konců zkušebních vzorků do upínacích čelistí trhačického stroje, kdy po spuštění stroje dojde postupně k odtrhu (odlupu) obou vrstev laminátu od sebe při doporučené rychlosti 100 mm.min⁻¹. Měří se minimální a maximální odlupová síla, která byla dosažena.

V ideálním případě by nemělo dojít k odlupu tkaniny z polymeru v celé ploše, protože to dokazuje nedokonalé prosycení vláken termoplastovou maticí a obecně špatné propojení výztuže a matrice, které je nežádoucí.

[44]

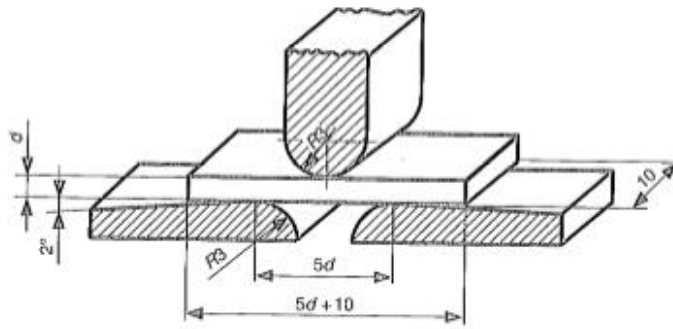
7.2 Zkouška tříbodovým ohybem

Norma ČSN EN ISO 14 125 (Vlákny vyztužené plastové kompozity – Stanovení ohybových vlastností)

Norma popisuje zkoušení tříbodovým a čtyřbodovým ohybem vlákniny vyztužených plastových kompozitů. Jelikož je v praktické části práce provedeno zkoušení tříbodovým ohybem, nebude zde čtyřbodový ohyb popisován.

Metoda zkoušení je vhodná pro reaktoplastické i termoplastické matrice. Norma nepojednává o nevyztužených a plněných plastech ani o krátkovláknových kompozitech.

Zkouška spočívá v ohýbání volně položeného zkušebního tělesa předepsaného tvaru a rozměrů na podpěrách o předepsané vzdálenosti (Obrázek 38). Vzorek je ohýbán zatěžovacím trnem konstantní rychlostí do doby, než dojde k jeho porušení nebo dokud nedosáhne deformace předem stanovené hodnoty. Doporučené hodnoty zkušební rychlosti jsou 0,5 až 500 mm.min⁻¹.



Obrázek 38 - Zkouška tříbodovým ohybem [2]

Měří se průhyb vzorku (Obrázek 39) a zatěžující síla, která na něj působí. Metodu používáme např. pro stanovení ohybových vlastností např. pevnosti v ohybu a ohybového modulu.

Vztah pro výpočet ohybového napětí σ_f :

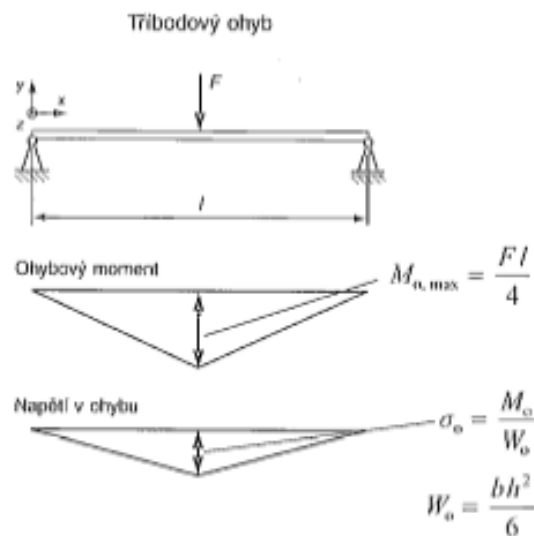
$$\sigma_f = \frac{3.F.L}{2.b.h^2}$$

F...síla [N]

L...vzdálenost podpěr [mm]

h...tloušťka tělesa [mm]

b...šířka tělesa [mm]



Obrázek 39 - Průběh zatížení vzorku při tříbodovém ohybu [2]

Rozměry vzorků pro tříbodový ohyb v našem případě spadají do Třídy II – plasty vyztužené rohožemi a tkaninami a smíšenými vyztužemi. Zkušební tělesa mohou být vyrobená vstřikováním, lisováním nebo obrobením. Minimální počet zkušebních těles je pět. Rozměry těles udává Tabulka 15.

[45]

Tabulka 15 - Rozměry zkušebního tělesa dle normy ČSN EN ISO 14125 [45]

Délka (l) [mm]	Šířka (b) [mm]	Vzdálenost podpěr (L) [mm]	Tloušťka (h) [mm]
80	15	64	4

Výpočtové vztahy pro modul pružnosti v ohybu udávají následující vzorce.

Modul pružnosti v ohybu E:

$$E = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot y \cdot J} \text{ [MPa]}$$

y...průhyb [mm]

F...zatěžující síla [N]

J...moment setrvačnosti průřezu [mm⁴]

L...vzdálenost podpor [mm]

$$L = (16 \pm 1) \times h \text{ [mm]}$$

Moment setrvačnosti průřezu pro obdélník:

$$J = \frac{1}{12} b \cdot h^3 \text{ [mm}^4\text{]}$$

[2]

7.3 Zkouška rázem v ohybu

Zkoušky rázem v ohybu u kompozitů probíhají obdobně, jako u jiných materiálů. Zkušební metody jsou podle Charpyho, kdy však těleso není opatřeno žádným vrubem a

je položeno vodorovně na podpěrách. Jedním úderem Charpyho kladiva je vzorek uprostřed přeražen. Měří se rázová energie potřebná právě k přeražení vzorku. Druhou zkušební metoda je dle Izoda, kdy je vzorek naopak umístěn svisle a vetknut za jeden konec.

Schopnost materiálu absorbovat mechanickou energii při zatížení vysokou rychlostí se nazývá rázová odolnost. Nižší odolnost mají většinou materiály s vyššími moduly pružnosti E a jsou proto i křehčí. Rázovou energii můžeme rozložit na dvě složky, ze kterých se skládá a to na energii potřebnou k iniciaci trhliny a energii nutnou pro její šíření materiálem. Zkouška rázem v ohybu může být tzv. instrumentovaná, kdy je její průběh zaznamenáván.

Mechanismy absorpce energie jsou u vláken vyztužených kompozitů:

- porušení celistvosti vláken,
- přetváření a porušení matrice,
- oddělení vláken od matrice (porušení adheze mezi nimi),
- vytáhnutí vláken z matrice,
- delaminace (oddělení jednotlivých vrstev od sebe).

[9]

Norma ČSN EN ISO 179-1 se používá hlavně pro plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy (část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška).

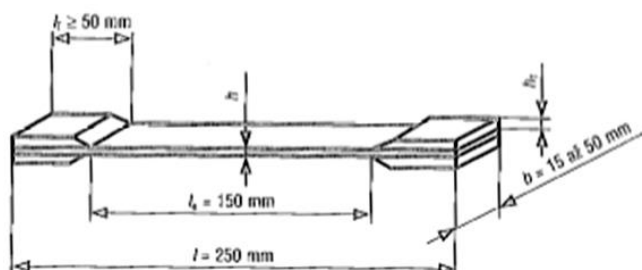
7.4 Zkouška tahem

ČSN EN ISO 527 – 1 až 5

Zkouška tahem kompozitních materiálů probíhá obdobně jako u ostatních materiálů. Spočívá v upnutí konců vzorku do čelistí trhačího stroje a v následném zatěžování tělesa až do jeho přetržení.

Pro kompozity vyztužené tkaninou se nejvíce hodí zkušební tělesa prizmatického tvaru, která mají zesílené části v místě pro upnutí (l_T a h_T) viz Obrázek 40.

Modul pružnosti v tahu materiálu zesílení (příložky) by měl být srovnatelný s modulem zkoušeného kompozitu. Aby byl eliminován výskyt míst s vyšší koncentrací napětí, měly by být ostré hrany mezi kompozitem a zesílením zkosené. Lom vzorku by měl nastat uvnitř měřené délky alespoň 10 mm od zesílených částí. Síla působí na vzorek smykem přes vrstvu lepidla ve vyztužených koncích.



Obrázek 40 - Doporučený tvar a rozměry zkušební tělesa pro zkoušku tahem dle ČSN EN ISO 527 [2]

Výpočtové vztahy:

Napětí σ [MPa]:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Modul pružnosti v tahu E [MPa]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l_0}{\Delta l}$$

F ...zatěžující síla [N]

l_0 ...počáteční délka tělesa [mm]

A_0 ...počáteční průřez tělesa v místě počáteční délky l_0 [mm²]

ε ...poměrné prodloužení [-]

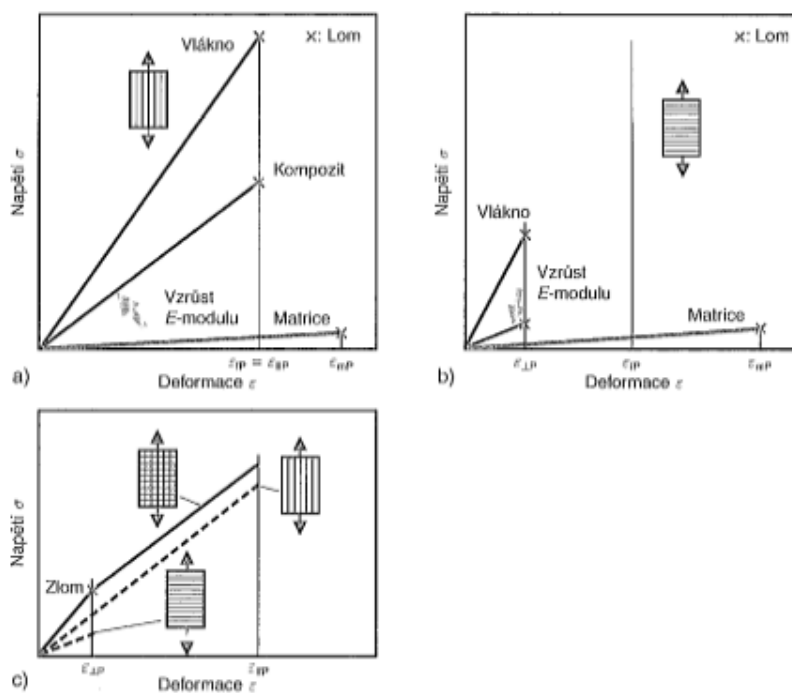
σ ...napětí [MPa]

V diagramu závislosti napětí na poměrném prodloužení (Obrázek 41) se objevuje zlom v místě, kde nastane porušení příčně orientované vrstvy. Tento jev je běžný např. u laminátů vyztužených tkaninou. Působí zde 3 různé jevy:

- adheze vlákna a matrice
- koncentrace protažení
- doplňková napětí.

Když u prepregů vzniká trhlinka, může se někdy ozývat i praskání. Zlom v diagramu vznikne porušením rozhraní matrice – vlákno u vláken orientovaných ke směru tahového zatížení kolmo.

[2]



Obrázek 41 - Diagram závislosti síly na poměrném prodloužení laminátu s vyztuží jednosměrně orientovaných vláken a z tkaniny; a) zatížení ve směru vláken, b) kolmo na směr vláken; c) zlom u zatížení laminátu vyztuženého ve dvou kolmých směrech [2]

Lamináty vyrobené z prepregů se mohou dále podrobit zkoušce pevnosti v tlaku, smykové pevnosti, tvrdosti, hořlavosti, absorpci vody a dalším zkouškám.

II - PRAKTICKÁ ČÁST

8 POPIS EXPERIMENTU A OČEKÁVANÝ PŘÍNOS

Cílem experimentu je vytvoření prepregu a následně laminátu, jehož matrice bude polymerní a vyztužující složka čedičová nebo kevlarová. Proto byly jako výchozí materiály vybrány čedičová tkanina plátňové a keprové vazby, kevlarová tkanina plátňové vazby a polyethylenový (PE) prášek. PE prášek se bude natavovat a smáčet vlákna tkaniny. Otázkou zůstává, jak se povede vlákna matricí prosytit, protože jak již bylo několikrát zmiňováno, termoplasty mají vyšší viskozitu a jeví se tudíž pro tvorbu prepregů méně vhodné než reaktoplasty. PE byl pro materiál matrice vybrán pro své rozšířené použití, nízkou cenu, dobré vlastnosti a snadnou zpracovatelnost. Po zvládnutí výroby prepregů a laminátů z tohoto termoplastu by měl být nahrazen polymerem vykazujícím lepší hodnoty mechanických vlastností.

Po úvodním praktickém seznámení s výrobou prepregů a laminátů měly být postupným vylepšováním vytvořeny vzorky o co nejlepších mechanických vlastnostech. Výrobní postup včetně testování by měl být doporučen pro pozdější možnou mechanizovanou a automatizovanou velkosériovou výrobu těchto prepregů. Tato práce by měla sloužit jako vstupní zdroj pro další pokračovatele, kteří na vývoj těchto kompozitních materiálů budou navazovat.

9 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES A ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

9.1 Použité materiály

Čedičová tkanina:

- plátnová vazba (402 g.m⁻²)
- keprová vazba (610 g.m⁻²)

Kevlarová tkanina:

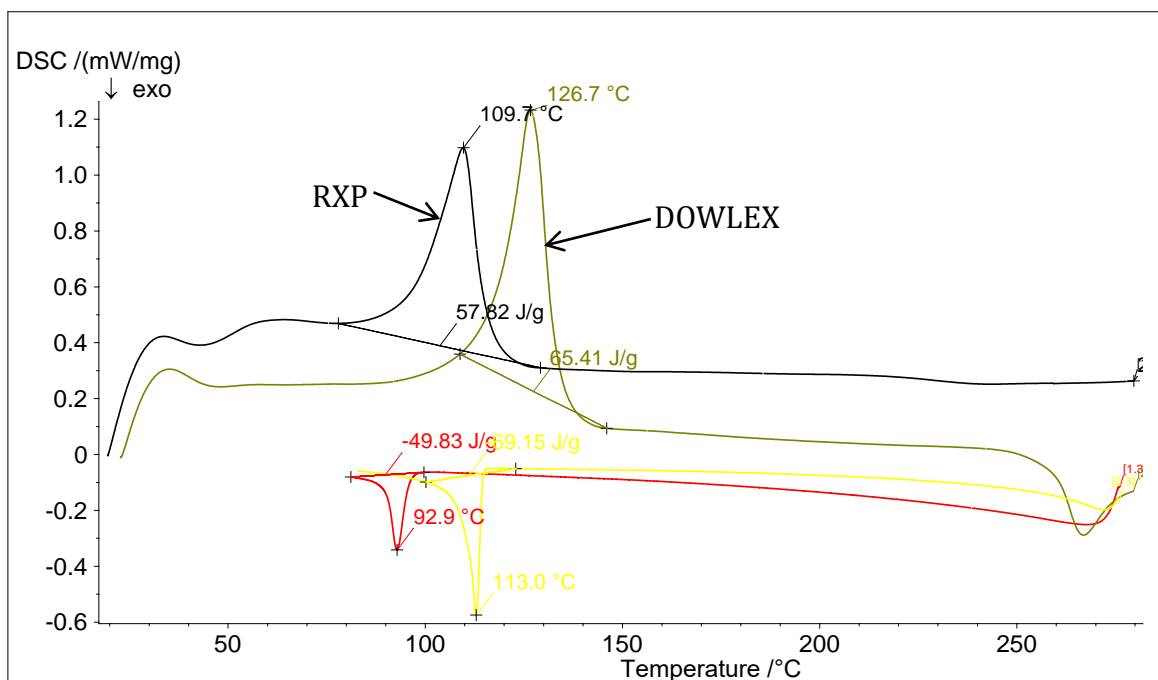
- plátnová vazba (243 g.m⁻²)

PE prášek:

- DOWLEX s nízkou hodnotou viskozitního toku taveniny
- RXP 1001 NATURAL (LD/70/600μm) (ITT 70)
 - PE prášek o nízké hustotě (0,919 g/cm³)
 - dobrá tekutost po roztavení
 - nižší viskozita než u klasického PE prášku
 - teplota tání: 104°C

9.1.1 Metoda DSC

Pomocí diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) byly určeny teploty tání a teploty krystalizace obou PE prášků. Plochy pod píky označují entalpie fázových přechodů. U prášku RXP 1001 NATURAL (LD/70/600μm) byla naměřena teplota tání 109,7°C a teplota krystalizace 92, 9°C. U PE prášku s nižší hodnotou viskozitního toku taveniny (DOWLEX) byla naměřena teplota tání 126,7°C a teplota krystalizace 113°C. Z výsledku naměřených teplot tání vidíme, že prášek RXP 1001 NATURAL (LD/70/600μm) taje při podstatně nižší teplotě, než druhý prášek. Prášek RXP 1001 NATURAL (LD/70/600μm) je proto pro ruční výrobu vzorků vhodnější, jelikož může být dosahováno nižších teplot při výrobě, než u druhého prášku. Záznam z DSC měření nám udává graf na Obrázku 42.



Obrázek 42 - DSC pro použité PE prášky

9.2 Výroba zkušebních těles

Všechna zkušební tělesa byla vytvořena ručním kladením ze zmíněných druhů materiálů za působení tepla a tlaku (přibližně 83 kPa) vyhřívané desky. Důležité je zmínit, že orientace tkanin u všech vyráběných vzorků byla vždy totožná a nedocházelo k její změně.

9.3 Provedené zkoušky mechanických vlastností

Vzorky byly nejprve podrobeny T - zkoušce, aby se zjistilo, jak dobrou adhezi jeho jednotlivé vrstvy mezi sebou mají. Dále byly zkoušeny na tříbodový ohyb (i nasáklé) a byly připraveny výbrusy pro pozorování na mikroskopu pro zjištění adheze mezi maticí a vlákny a možných vad, např. vznik dutin.

9.3.1 T - zkouška

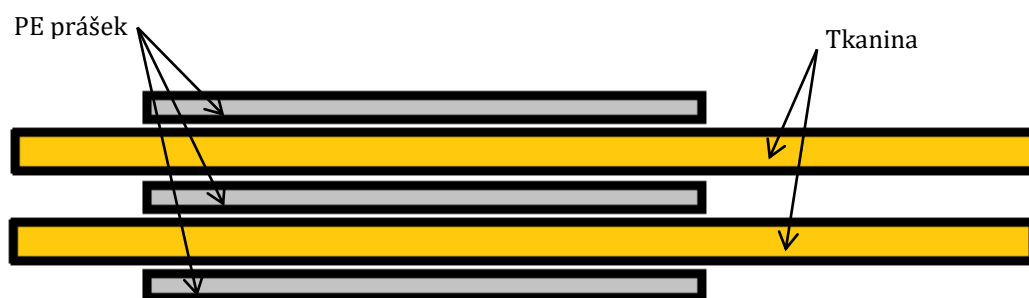
Tato zkouška je inspirována T - zkouškou v odlupování lepených sestav z ohebných adherendů (norma ČSN EN ISO 11 339). Důvody a bližší informace jsou popsány v teoretické části práce (str. 51).

Na základě inspirace normou je postup následující. V našem případě spočívá výroba zkušebních vzorků ve vytvoření laminátů tak, že jsou vždy dvě vrstvy tkaniny spojeny roztaveným polymerním práškem. Celé vzorky obdélníkového tvaru tak mají rozměry přibližně 25 x 200 mm. Konce by měly zůstat volné asi v délce 50 mm, aby bylo možné je upevnit do čelistí univerzálního trhacího stroje. Samotné vzorky by měly být široké cca 25 mm a dlouhé 150 mm (počítáno bez částí pro upnutí).

9.3.1.1 Výroba vzorků

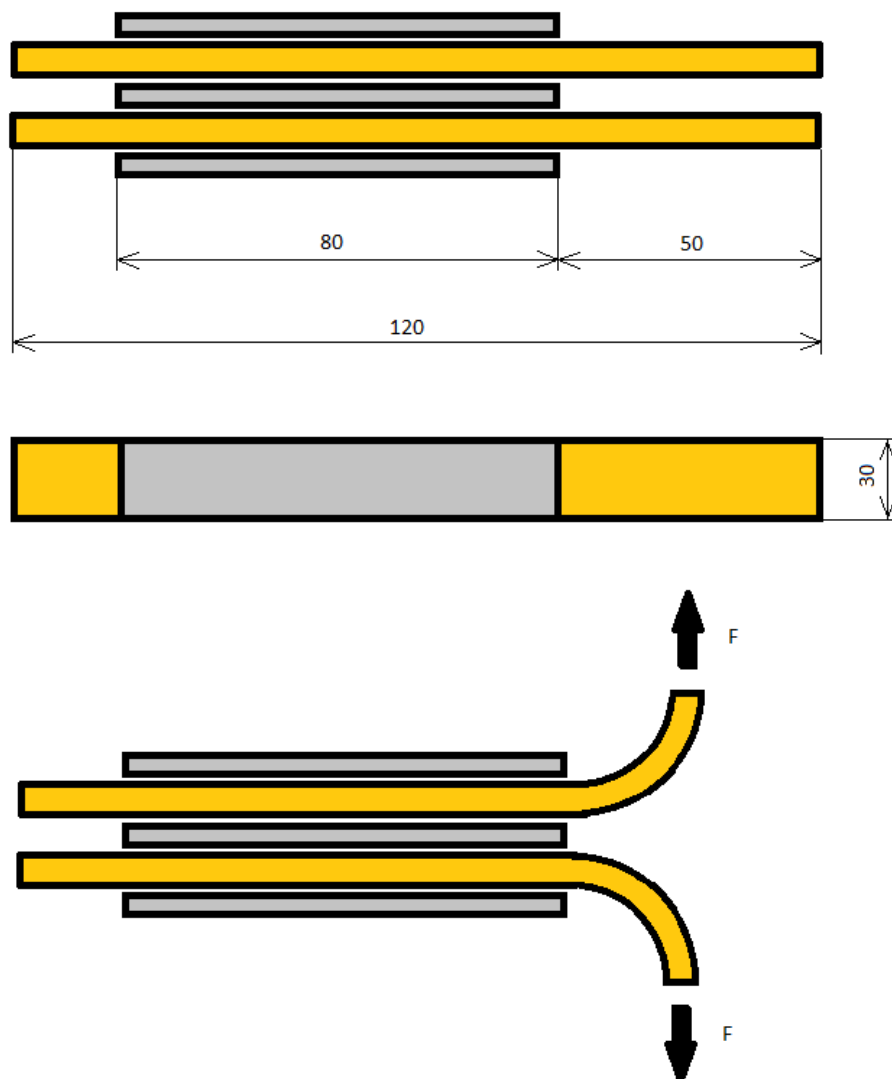
Hlavním úskalím přípravy vzorků je samotná manipulace s tkaninou, která se téměř samovolně rozpadá a její okraje je proto vhodné fixovat, aby nedocházelo k vypadávání pramenců a znehodnocování vyrobených vzorků. Za nejlepší způsob bylo vyhodnoceno fixování pomocí textilní pásky, která dobře odolávala teplotnímu působení vyhřívané desky.

Pro první testování bylo vyrobeno stejnou metodou pět vzorků totožných rozměrů z PE prášku s nízkým ITT (DOWLEX) a čedičové tkaniny plátňové vazby. Jak vypadalo vrstvení PE prášku a čedičové tkaniny udává Obrázek 43.



Obrázek 43 - Schéma vrstvení vzorku pro T - zkoušku

Na Obrázku 44 jsou vidět rozměry, skladba vzorku a místa upnutí do čelistí trhacího stroje označené šipkou a písmenem F (působící síla). Rozměry vzorků vycházejí z normy, avšak nejsou zcela totožné. Závisely hlavně na dostupném rozměru pásu tkaniny. Šířka vzorku musela být oproti normou předepsané hodnotě zmenšena vzhledem k rozměrům upínacích čelistí.



Obrázek 44 - Rozměry vzorků pro T - zkoušku

Jelikož není téměř možné při ruční přípravě dosahovat stejných teplot vzorků, teploty se mírně liší (viz. Tabulka 16). Teplota byla měřena vždy ihned po vytvoření

vzorku. Výrobní postup byl nanesení PE prášku na tkaninu a zahřátí po dobu 10 s do jeho úplného roztavení. Teplota vyhřívané desky byla 184 °C.

Tabulka 16 - Teploty při výrobě vzorků č. 1 až 5

Vzorek č.	Teplota vzorku [°C]
1	140
2	135
3	130
4	145
5	150

9.3.1.2 Průběh zkoušky

Vzorky byly podrobeny T – zkoušce na univerzálním trhacím stroji při doporučené rychlosti zatěžování 100 mm.min⁻¹. Hladký průběh zkoušky narušovalo vypadávání a vytahování některých vláken tkaniny, zapříčinené fixováním jejích okrajů pouze v místech mimo testovanou oblast (patrné z Obrázku 45).

9.3.1.3 Výsledky zkoušky

U vzorků č. 1 až 4 došlo k úplnému odtržení vrstvy tkaniny od vrstvy polymeru. Důvodem bylo pravděpodobně nedokonalé prosycení tkaniny matricí. Aby byl výsledek zkoušky uspokojivý, mělo by dojít k odtrhu PE ideálně tak, aby poměr práškem nasycených ploch obou tkanin byl přibližně 50:50, načež by bylo jasné, že polymer nasýtil obě tkaniny. Nejlepším výsledkem by však bylo, kdyby se vzorek porušil v PE vrstvě a matrice ulpěla na obou plochách (tkaninách) vzorku. Jak vzorky vypadaly po zkoušce ukazuje Obrázek 45.

U vzorku č. 5 došlo k odtrhu přibližně na 75 % procentech testované plochy tkaniny, což bylo přijatelnější než výsledky u předchozích vzorků (Obrázek 45). Důvodem nejlepšího výsledku mohla být nejvyšší teplota v průběhu výroby vzorku.



Obrázek 45 - Vzorek č. 1 (vlevo) a vzorek č. 5 (vpravo) po provedené T - zkoušce

V grafu naměřených hodnot byla nejvyšší naměřená síla F_{max} 195 N pro vzorek č. 5. Důvodem mohla být nejvyšší výrobní teplota vzorku (Tabulka 16). Hodnoty maximálních naměřených sil udává Tabulka 17.

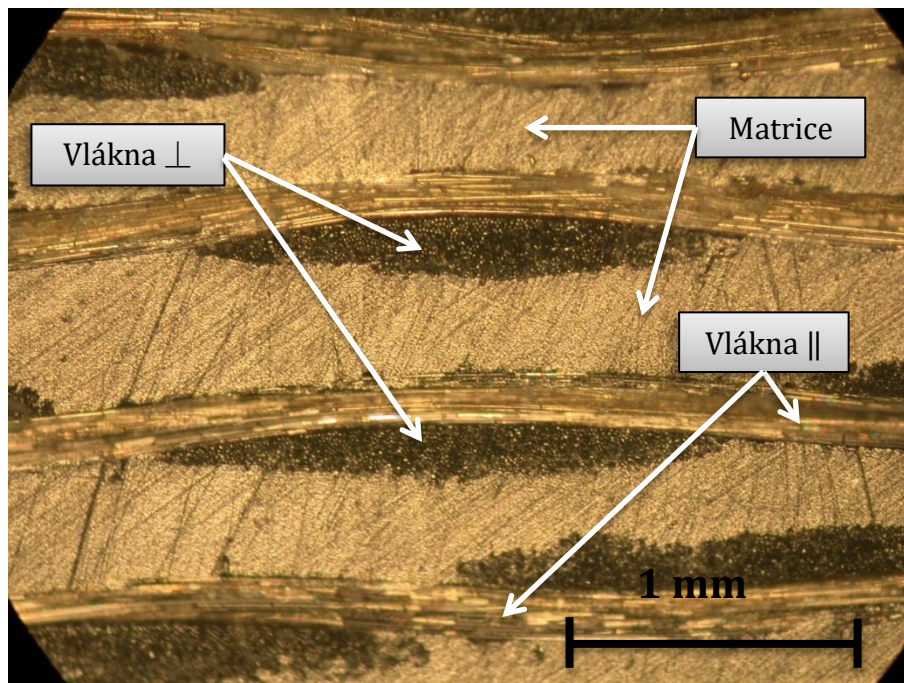
Tabulka 17 - Maximální naměřené hodnoty sil u T - zkoušky

Vzorek č.	F_{max} [N]
1	165
2	120
3	90
4	110
5	195

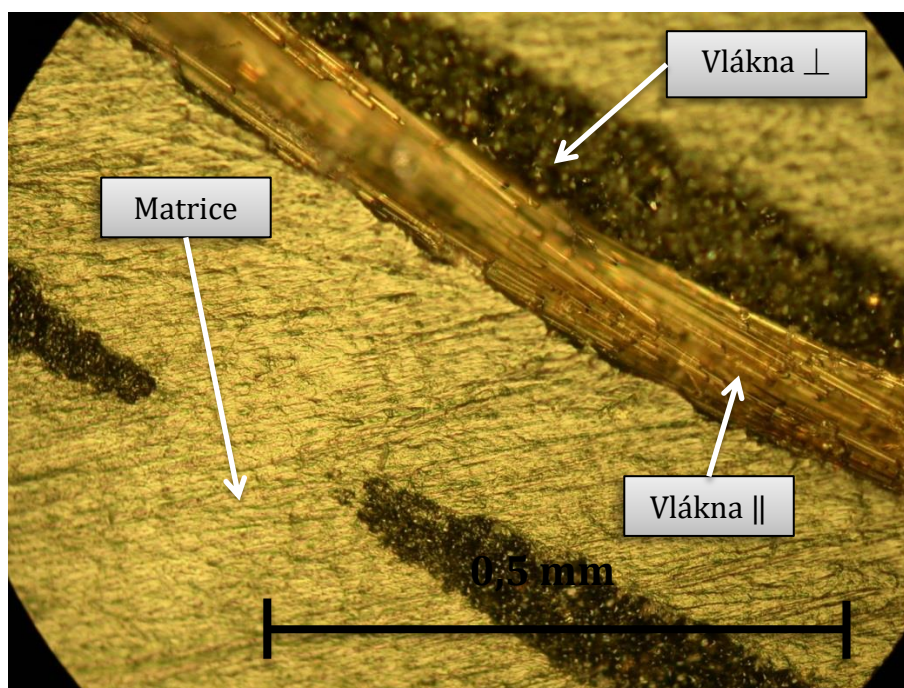
Nutno dodat, že na výsledky mohou být ovlivňovány negativním posunem a odpadáváním vláken. Pokud je tkanina velmi hustá, matrice má problém skrz malé mezery proniknout na druhou stranu. Pokud se ale vlákna špatnou manipulací posunou a mezery se tak zvětší, průnik polymeru je pak snadnější.

Výsledkem této zkoušky je i fakt, že prášek má příliš malý index viskozitního toku taveniny a není tak pro tvorbu prepregů vhodný. Pro charakterizaci byl vytvořen výbrus

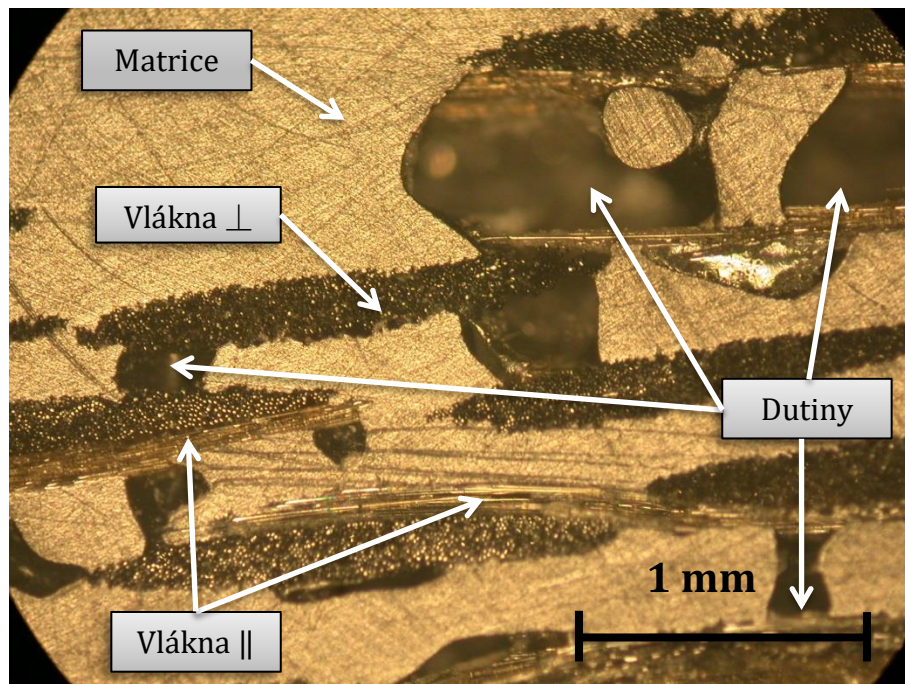
(Obrázky 46, 47, 48), aby bylo u vzorku s více vrstvami tkaniny a PE prášku vidět, zda jsou vrstvy a vlákna v kompozitu matricí dobře prosyceny. PE prášek bylo třeba pro výrobu dalších zkušebních tělísek změnit na takový, který má vyšší index viskozitního toku taveniny. Byl zvolen prášek s označením RXP 1001 NATURAL (LD/70/600 μ m).



Obrázek 46 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE (DOWLEX)



Obrázek 47 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE (DOWLEX)



Obrázek 48 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE (DOWLEX)

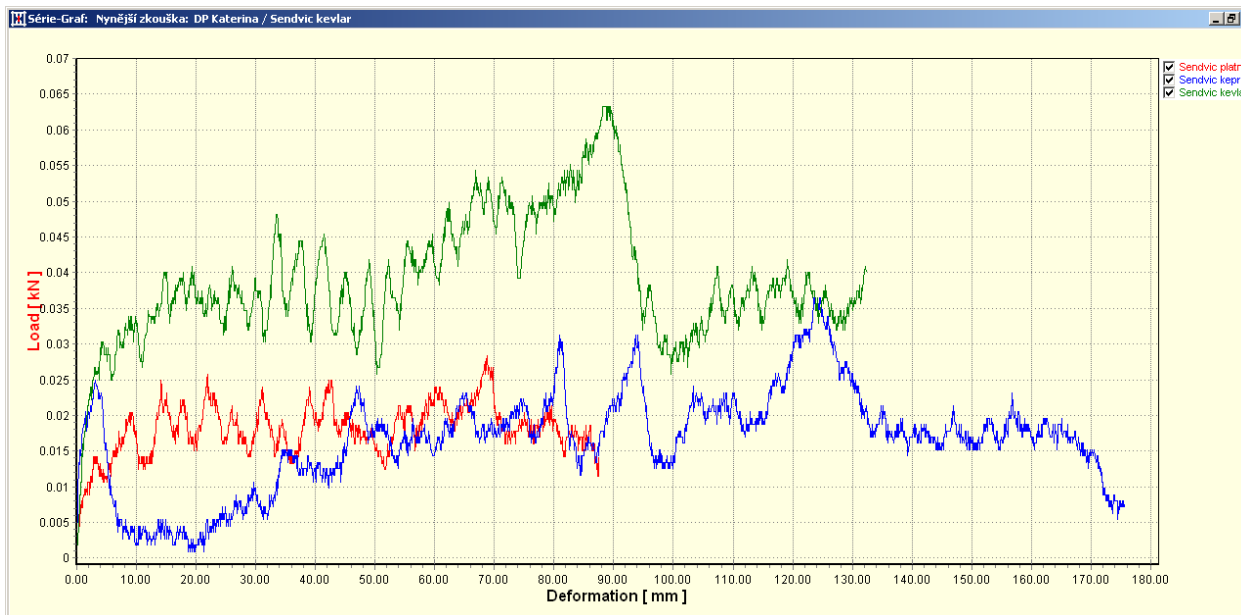
9.3.2 T - zkouška pro porovnání různých druhů tkanin

9.3.2.1 Výroba vzorků a průběh zkoušky

Ke zkoušce byla vyrobena tři zkušební tělesa stejných rozměrů stejnou technologií, jako při předešlé zkoušce. Použitý prášek byl tentokrát RXP 1001 NATURAL (LD/70/600 μ m). Rozdíl mezi těmito třemi vzorky byl pouze v materiálu tkaniny nebo její vazbě. Rychlost zatěžování byla dle normy opět 100 mm.min⁻¹.

9.3.2.2 Výsledky zkoušky

Z tabulky naměřených hodnot (Tabulka 18) plyne, že nejvyšší naměřenou hodnotou síly odtrhu je 64 N u kevlarové tkaniny plátnové vazby a nejnižší 25 N u čedičové tkaniny plátnové vazby. Průběh měření znázorňuje graf na Obrázku 49.



Obrázek 49 - Graf závislosti síly a deformace T - zkoušky

Tabulka 18 - Maximální naměřené hodnoty sil u T - zkoušky pro porovnání různých druhů tkanin

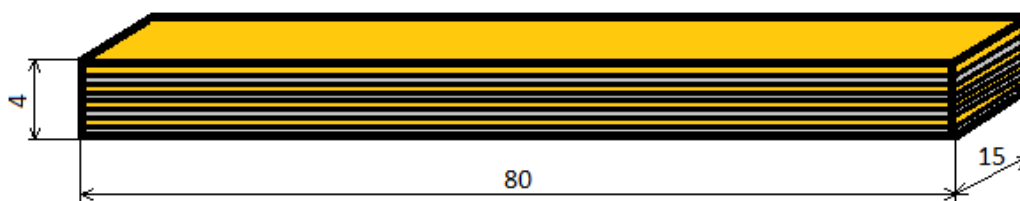
Typ tkaniny	F_{max} [N]
Čedičová tkanina plátnové vazby	25
Čedičová tkanina keprové vazby	38
Kevlarová tkanina plátnové vazby	64

9.3.3 Zkouška tříbodovým ohybem pro porovnání různých typů tkanin

Průběh zkoušky i výroba zkušebních těles proběhla na základě normy ČSN EN ISO 14 125.

9.3.3.1 Výroba vzorků

Vzorky mají tvar hranolu o normou předepsaných rozměrech $b \times h \times l$. V našem případě by se mělo jednat o rozměry 15 x 4 x 80 mm (graficky znázorněno na Obrázku 50). Vyrobena jich bylo celkem 15, pět z čedičové tkaniny plátnové vazby, pět z čedičové tkaniny keprové vazby a ostatních pět z kevlarové tkaniny plátnové vazby. Matricí byl vždy PE prášek RXP 1001 NATURAL (LD/70/600 μ m). Údaje o hmotnosti, hustotě a podílu výztuže v laminátu jsou v Tabulce 19.

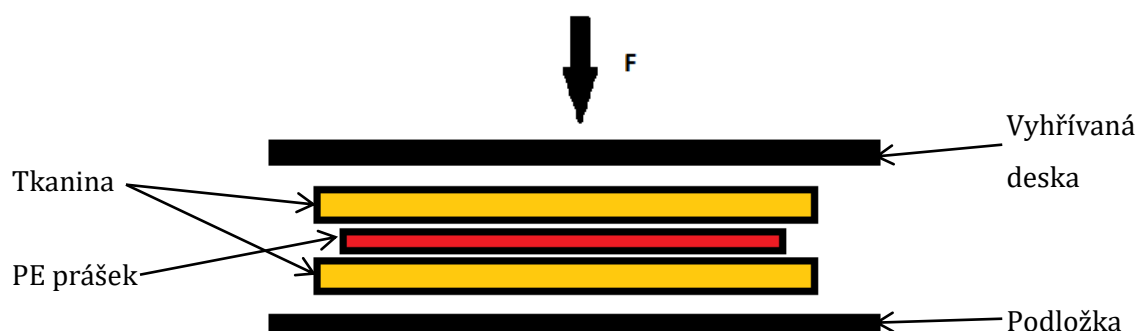


Obrázek 50 - Rozměry vzorku pro zkoušku tříbodovým ohybem

Tabulka 19 - Podíl výztuže v laminátu a hustota jednotlivých typů tkanin

Typ tkaniny	Čedičová tkanina plátnové vazby	Čedičová tkanina keprové vazby	Kevlarová tkanina plátnové vazby
Hmotnost jedné vrstvy tkaniny m [g]	0,4825	0,7322	0,2919
Hmotnost laminátu o osmi vrstvách tkaniny a PE m [g]	3,7631	7,5220	4,0193
Výztuž v laminátu [hm. %]	81	78	59
Plošná hmotnost tkaniny [g.m ⁻²]	402	610	243

Každý vzorek je laminát tvořený z osmi vrstev tkaniny. V jeden celek byl laminát propojený nataveným polymerním práškem. Jeho natavení probíhalo vždy po dobu 10 s u každé jednotlivé vrstvy tkaniny. Schéma výroby laminátu je na Obrázku 51. Teplota vyhřívání desky byla 189 °C.



Obrázek 51 - Schéma výroby laminátu pro zkoušku tříbodovým ohybem

Na konečný rozměr (Tabulka 20 až 22) byly lamináty uchycené ve svěráku nařezány ruční pilkou. Ruční řezání zapříčinilo u mnoha vzorků nedodržení přesného rozměru. Do budoucnosti je doporučeno řezat vzorky na automatické pile, aby se předešlo zmíněnému problému. Pozdější výpočet E - modulů v ohybu je zjišťován pro každý jednotlivý vzorek zvlášť v závislosti na jeho rozměrech, proto musíme brát tyto hodnoty pouze jako informativní a nelze v této fázi přípravy vzorků vytvářet statistiku. Rozměry byly změřeny vždy na třech místech vzorku a v tabulkách jsou uváděny průměrné hodnoty (*b* a *h*).

Tabulka 20 - Rozměry zkušebních těles (čedičová tkanina plátňové vazby)

Číslo vzorku	b [mm]	h [mm]
1	15,6	3,5
2	15,2	3,9
3	15,3	3,2
4	16,5	3,5
5	16,3	3,2

Tabulka 21 - Rozměry zkušebních těles (čedičová tkanina keprové vazby)

Číslo vzorku	b [mm]	h [mm]
1	15,9	3,7
2	15,1	4,0
3	16,7	4,1
4	16,0	4,1
5	15,7	4,0

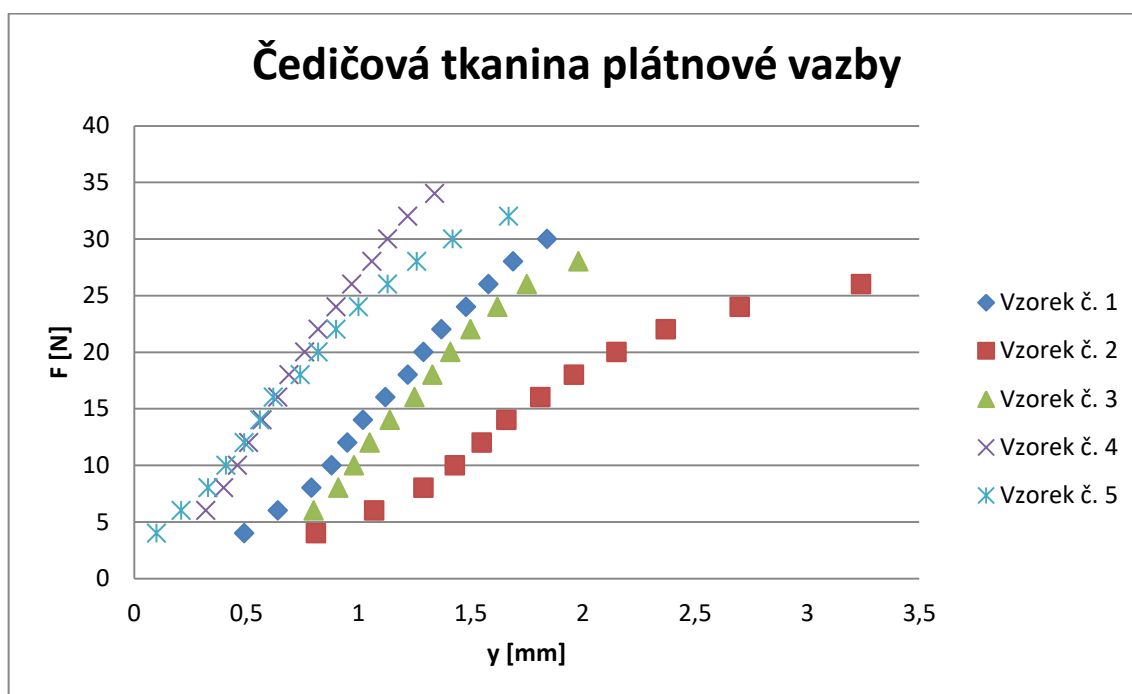
Tabulka 22 - Rozměry zkušebních těles (kevlarová tkanina plátňové vazby)

Číslo vzorku	b [mm]	h [mm]
1	16,7	4,2
2	17,0	4,3
3	16,4	4,6
4	14,5	4,0
5	17,7	4,0

9.3.3.2 Průběh zkoušky

Zkouška tříbodovým ohybem spočívá v položení zkušební vzorku volně na podpory stroje, které se musí nejprve nastavit na požadovaný rozměr L daný normou, který vychází z rozměrů samotného vzorku. V našem případě je hodnota $L = 64$ mm. Podpory se vzorkem se pohybují směrem nahoru a trn umístěný uprostřed na opačné straně postupně vzorek ohýbá. Hodnoty zatěžující síly F a průhybu y byly zaznamenávány a zapsány do tabulek (Příloha 1, Příloha 2 a Příloha 3).

Graf naměřených hodnot u vzorků s čedičovou tkaninou plátňové vazby ukazuje Obrázek 52. Pro každý vzorek byl vypočítán modul pružnosti v ohybu E (Tabulka 23). Vidíme, že nejmenší naměřená hodnota E byla 4 200 MPa a nejvyšší 9 600 MPa.

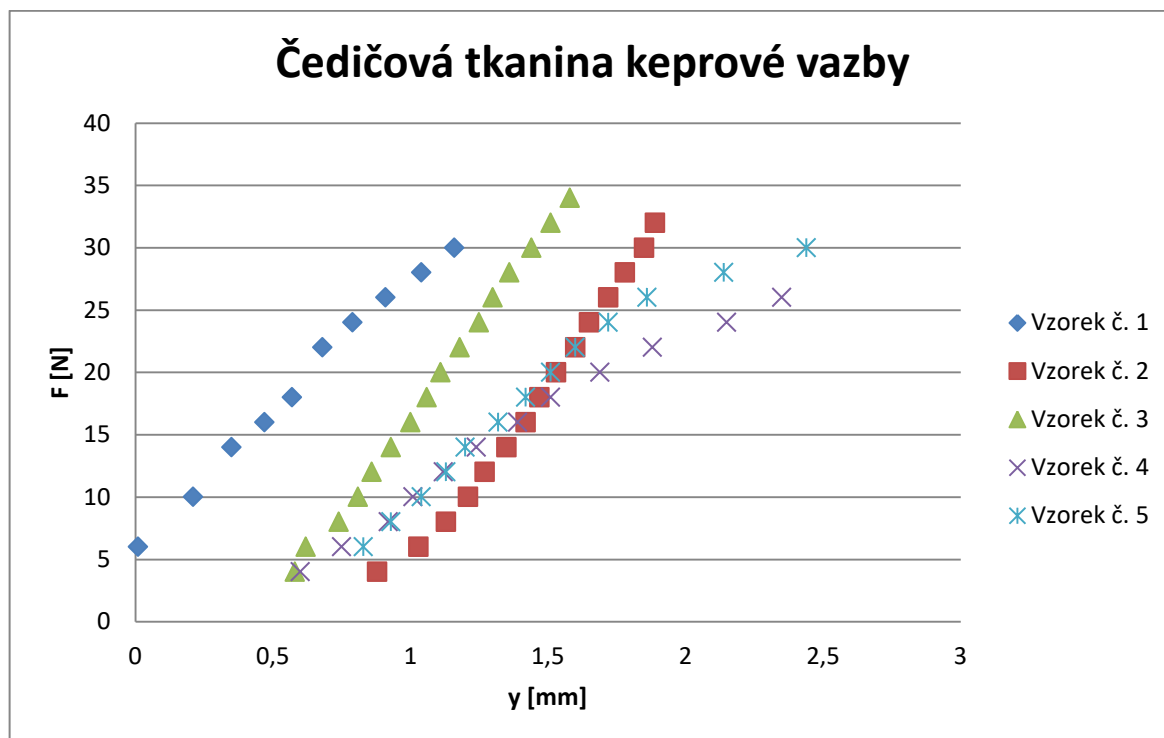


Obrázek 52 - Graf naměřených hodnot síly a průhybu vzorků s čedičovou tkaninou plátňové vazby

Tabulka 23 - Hodnoty modulů pružnosti v ohybu vzorků s čedičovou tkaninou plátňové vazby

Vzorek č.	E [MPa]
1	8 300
2	4 200
3	9 600
4	9 600
5	8 400

Graf naměřených hodnot byl obdobně vytvořen i pro vzorky s čedičovou tkaninou keprové vazby (Obrázek 53). Zde byla nejmenší hodnota E 4 100 MPa a nejvyšší 8 300 MPa (Tabulka 24).

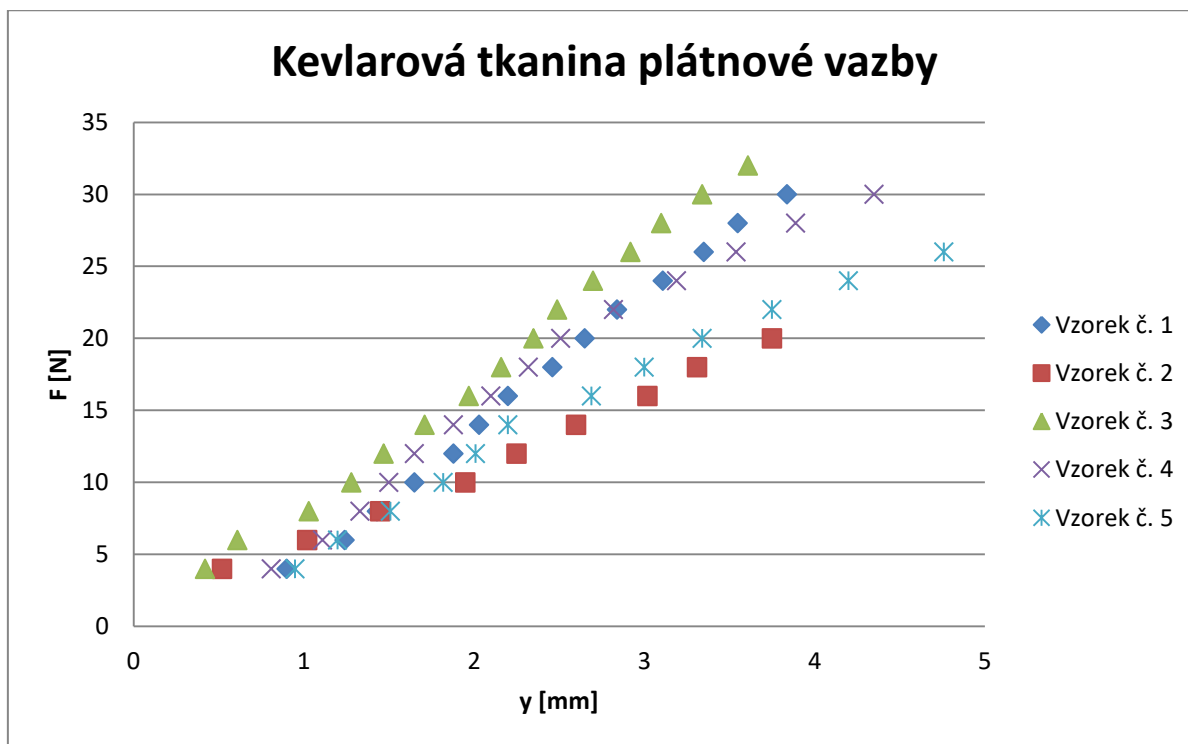


Obrázek 53 - Graf naměřených hodnot síly a průhybu vzorků s čedičovou tkaninou keprové vazby

Tabulka 24 - Hodnoty modulů pružnosti v ohybu vzorků s čedičovou tkaninou keprové vazby

Vzorek č.	E [MPa]
1	6 300
2	8 300
3	7 300
4	4 100
5	5 600

Třetí série vzorků byla vyztužena kevlarovou tkaninou plátnové vazby. I zde vidíme graf naměřených hodnot (Obrázek 54). Nejnižší hodnotou E je 1 100 MPa a nejvyšší 2 500 MPa (Tabulka 25).



Obrázek 54 - Graf naměřených hodnot síly a průhybu vzorků s kevlarovou tkaninou plátnové vazby

Tabulka 25 - Hodnoty modulů pružnosti v ohybu vzorků s kevlarovou tkaninou plátnové vazby

Vzorek č.	E [MPa]
1	2 100
2	1 100
3	1 800
4	2 500
5	1 500

9.3.3.3 Výsledky zkoušky

Z vypočtených modulů E ze zkoušky tříbodovým ohybem můžeme říci, že nejnižších hodnot dosahují vzorky s kevlarovou tkaninou. Vzorky se jevily velmi ohebné už při výrobě, proto není tento výsledek tak překvapivý. Kevlarová tkanina je již sama osobně mnohem poddajnější a ohebnější, než čedičová při stejné vazbě. Hodnoty E u vzorků z čedičové tkaniny keprové vazby jsou u všech vzorků nižší, než u vazby

plátnové (průměrně o 23 %). Průměrné hodnoty včetně směrodatných odchylek popisuje Tabulka 26.

Tabulka 26 - Porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti v ohybu pro vzorky s odlišnými tkaninami

Typ tkaniny	ØE [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
Čedičová tkanina plátnové vazby	8 975	626
Čedičová tkanina keprové vazby	6 875	1 021
Kevlarová tkanina plátnové vazby	1 975	370

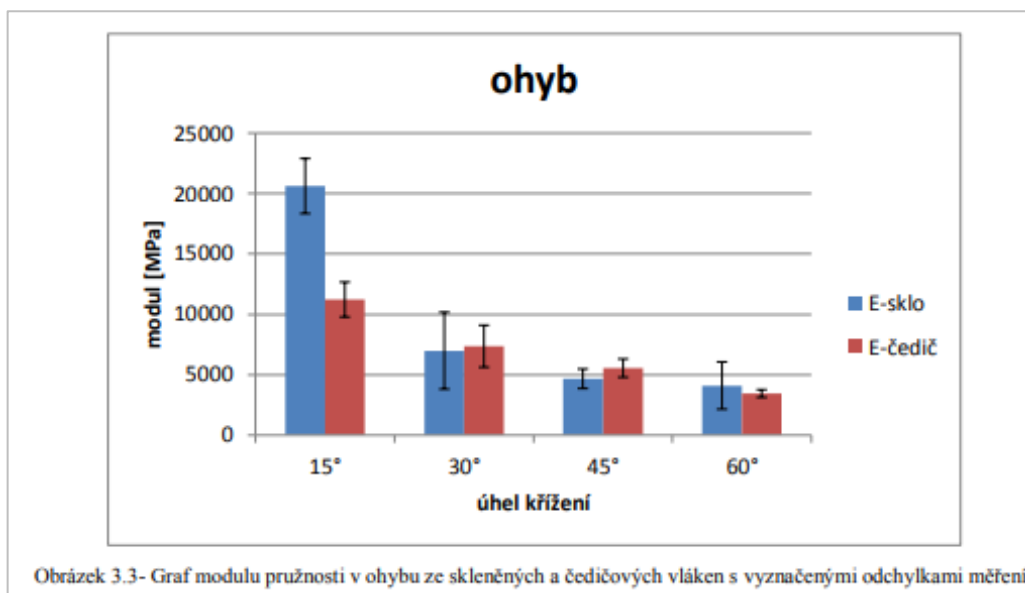
9.3.3.4 Porovnání s dostupnými internetovými zdroji

Následující údaje byly převzaty z internetových zdrojů, které popisují výrobu a zkoušku tříbodovým ohybem zkušebních těles z podobných kompozitních materiálů, jako tato práce.

Zdroj č. 1 [46]:

Parametry:

- výztuž: čedičové rovingy firmy Basaltex
- matrice: pryskyřice XB 3585 Resin
- tvrdidlo: XB 3458 Hardener
- průběh výroby vzorků: 100°C, 30 min v peci.



Obrázek 55 - Grafy naměřených hodnot - E modul v ohybu vzorků s čedičovými a skleněnými rovingy [46]

Hodnoty modulů pružnosti v ohybu se pohybují řádově ve stejných hodnotách MPa, jako v případě našich vypočtených hodnot (Obrázek 55).

Zdroj č. 2 [47]:

Parametry:

- hustota kevlarové tkaniny plátňové vazby: 200 g/m²
- matrice: epoxid Araldyt GY764BD
- tvrdidlo: Aradur H285
- průběh výroby vzorků: neuveden.

Epoxid - kevlarová vlákna - ohyb									
vzorek č.	tloušťka h [mm]	h _{stř.} [mm]	šířka b [mm]	b _{stř.} [mm]	A [mm ²]	I [mm ⁴]	ΔF/Δs	E [GPa]	E _{stř.} [GPa]
4	4,02	4,16	10,20	10,40	43,26	62,39	117,88	10,32	10,67
	4,27		10,40						
	4,14		10,60						
5	4,20	4,14	9,90	9,93	41,11	58,72	99,80	9,28	10,67
	4,22		10,00						
	3,99		9,90						
6	3,90	3,78	9,80	10,00	37,80	45,01	102,35	12,42	10,67
	3,75		10,10						
	3,69		10,10						

Obrázek 56 - Naměřené hodnoty při zkoušce tříbodovým ohybem epoxidu s kevlarovou tkaninou [47]

Z hodnot ve zdroji [53] vidíme, že se u E – modulů v ohybu pohybujeme o jeden řád v jiných hodnotách. V tabulce na Obrázku 56 jsou vidět naměřené hodnoty E.

Zdroj č. 3 [48]:

Parametry:

- výztuž: tkanina ze skelných vláken
- matrice: Polypropylen (PP)
- průběh výroby vzorků: 190°C, 30 min.

Tabulka 16. Naměřené hodnoty pro vzorek 2. PP matrice vyztužená tkaninou

Měření	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mo} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrná deformace ε [%]
1	2	20,5	73,4	5130	8,9
2	2	20,2	65,3	5050	1,6
3	2	20,6	72,1	5930	1,7
4	2	20,4	56	3750	1,8
5	2	20,3	72	5890	1,9
6	2	20,3	66,2	4350	2
7	2	20,5	73,3	5220	1,9
8	2	20,5	73	5940	1,9
9	2	20,6	75,1	5980	2
10	2	20,4	67,3	5780	1,8

Obrázek 57 - Naměřené hodnoty při zkoušce tříbodovým ohybem PP se skelnou tkaninou [48]

Hodnoty E – modulů v ohybu v internetovém zdroji [54] jsou řádově stejné, jako hodnoty u našeho měření (Obrázek 57). Byla použita termoplastová PP matrice a skelná tkanina.

9.3.4 Zkouška tříbodovým ohybem nasáklých vzorků

Průběh samotné zkoušky je stejný jako u nenasáklých vzorků.

9.3.4.1 Výroba vzorků a průběh zkoušky

Navlhavost a nasákavost materiálu mají vliv na změnu mechanických vlastností. Aby bylo zjištěno, zda – li vzorky nasákají a jak to ovlivňuje hodnoty modulů pružnosti v ohybu, byl sestaven plán pro měření jejich hmotnosti v různých časových intervalech (Tabulka 27). Podle naměřených hodnot hmotností m je vidět, že jsou vzorky opravdu nasákavé a že největší hmotnostní přírůstek má vzorek s čedičovou tkaninou plátňové vazby. Nárůst hmotnosti vzorků by mohl z části objasňovat i fakt, že nemuselo na všech místech dojít k úplné adhezi mezi vlákny a matricí. Mohly se vytvořit malé dutinky, ve kterých se voda zadržela a přispěla ke zvýšení hmotnosti.

Tabulka 27 - Naměřené hodnoty hmotnosti nasáklých vzorků ve zvolených časech

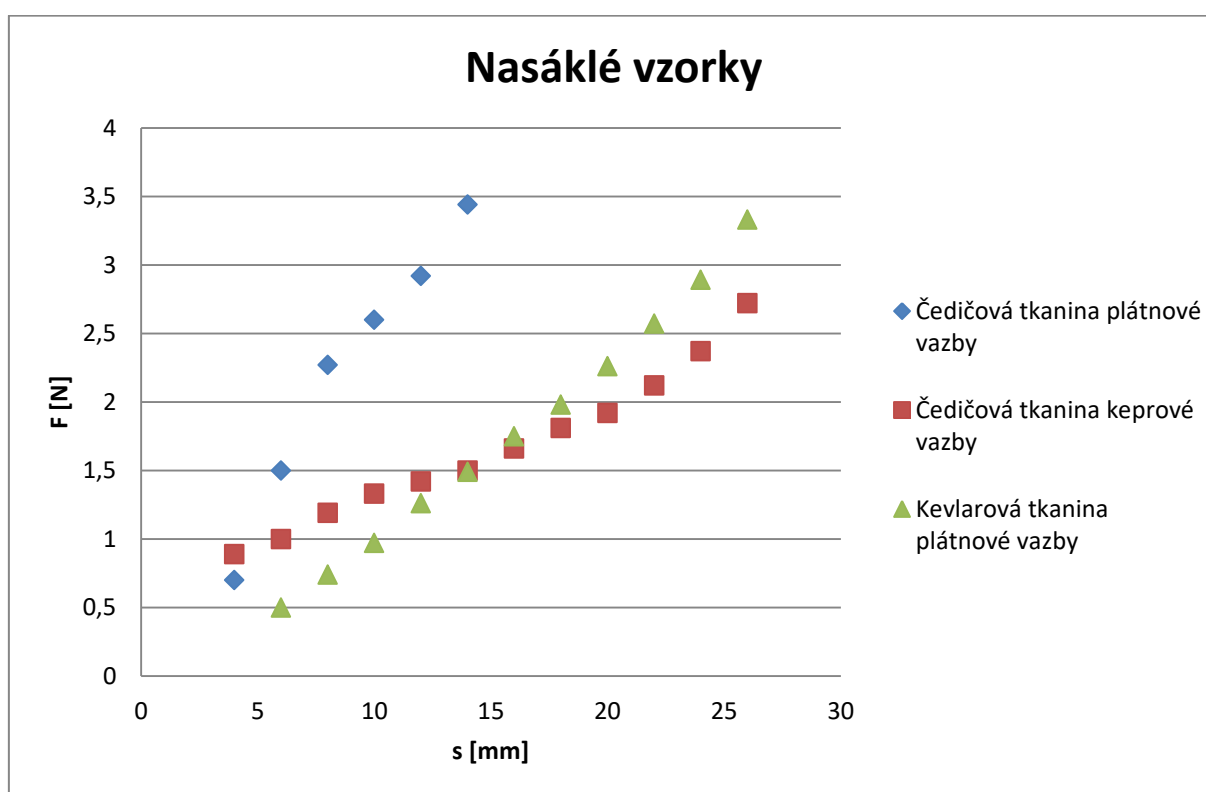
Tkanina	Vazba	0 hod.	24 hod.	120 hod.	Nasákavost (H ₂ O, 22°C, 120 hod.)
		m [g]	m [g]	m [g]	[%]
Čedič	Plátňová	3,7631	5,4459	5,5484	48
Čedič	Keprová	7,5220	8,0140	8,2227	9
Kevlar	Plátňová	4,0193	4,5168	4,6360	15

Vzorky byly vyrobeny obdobně jako ty pro předešlá měření tříbodového ohybu. Jejich rozměry a výchozí materiály jsou sepsány v Tabulce 28.

Tabulka 28 - Rozměry vzorků

Materiál	Vazba	b [mm]	h [mm]
Čedič	Plátňová	14,6	3,2
Čedič	Keprová	16,4	4,3
Kevlar	Plátňová	13,9	4,0

Z naměřených hodnot zatěžující síly F a průhybu y byl sestaven graf (Obrázek 58).



Obrázek 58 - Graf naměřených hodnot síly a průhybu nasáklých vzorků

9.3.4.2 Výsledky zkoušky

Z naměřených hodnot byly určeny moduly pružnosti E pro všechny tři vzorky (viz Tabulka 29). Nejnižší modul E vykazuje vzorek vyztužený čedičovou tkaninou plátňové vazby a to 2 200 MPa. Naopak nejvyšší hodnota 3 400 MPa byla naměřena u vzorku z čedičové tkaniny keprové vazby.

Nutno říci, že měření nasáklých vzorků bylo pouze doplňkové a má tak kvůli nízkému počtu zkoušených vzorků pouze informativní charakter. Aby bylo měření vypovídající, muselo by být od každého typu vzorku vytvořeno alespoň pět zkušebních těles.

Tabulka 29 - Hodnoty modulů pružnosti v ohybu navlhých vzorků

Typ tkaniny	E [MPa]
Čedičová tkanina plátnové vazby	2 200
Čedičová tkanina keprové vazby	3 400
Kevlarová tkanina plátnové vazby	2 300

9.3.4.3 Porovnání hodnot E - modulů v ohybu nenavlhých a navlhých vzorků

V Tabulce 30 vidíme porovnání hodnot E - modulů v ohybu nasáklých a nenasáklých vzorků (průměrné hodnoty). U kompozitu s kevlarovou maticí nedošlo k zásadní změně této mechanické vlastnosti a hodnoty se od sebe příliš neliší. Oproti tomu hodnoty navlhých vzorků s čedičovou maticí ukazují zásadní pokles hodnot.

Jak bylo již zmíněno, PE je nenavlhavý, protože se jedná o nepolární plast, kevlar naopak navlhá, protože je polární. Hodnota E - modulu v ohybu nasáklého kevlarového vzorku vyšla vyšší, než průměrná hodnota nenasáklých vzorků. Vyšší hodnota nasáklého vzorku mohla být dána chybou měření, které však nebylo zopakováno. Nepředpokládá se, že by nasákavost u kevlarového vzorku zvyšovala jeho modul pružnosti v ohybu.

Tabulka 30 - Porovnání - dosažené hodnoty nenavlhých a navlhých vzorků

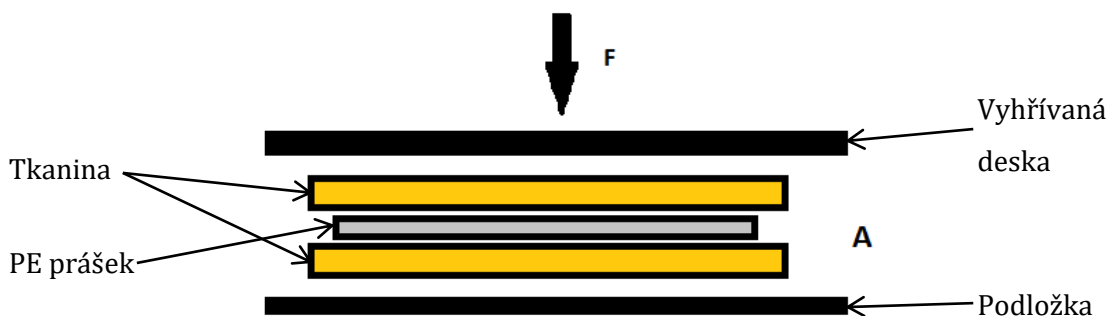
Typ tkaniny	\bar{E} [MPa] nenasáklé	Směrodatná odchylka [MPa]	E [MPa] nasáklé
Čedičová tkanina plátnové vazby	8 975	626	2 200
Čedičová tkanina keprové vazby	6 875	1 021	3 400
Kevlarová tkanina plátnové vazby	1 975	370	2 300

9.3.5 Způsoby ruční výroby laminátů

Jelikož je prepreg pouze polotovar a laminát vhodný pro výrobu součástí vzniká až spojením více jeho vrstev, bylo vhodné zjistit, jaký způsob kladení vrstev tkaniny a prosycování výztuží je nejvhodnější. Pro porovnání byla jako materiál výztuže vybrána čedičová tkanina v plátňové a keprové vazbě a PE prášek RXP 1001 NATURAL (LD/70/600 μ m).

9.3.5.1 Výroba vzorků

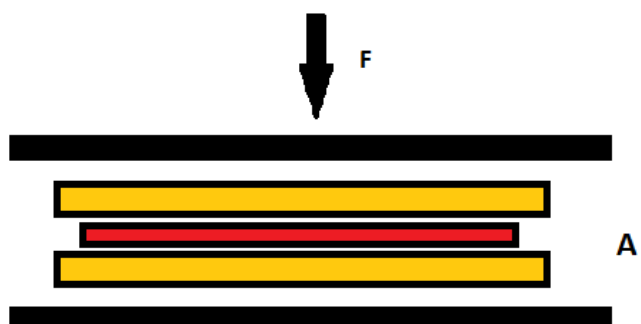
Každý způsob výroby vzorku vycházel nejprve ze spojení dvou vrstev tkaniny matricí do jednoho celku značeno jako A (Obrázek 59). Dále byly navrženy čtyři odlišné způsoby vrstvení tak, aby výsledný laminát obsahoval celkem 8 vrstev tkaniny.



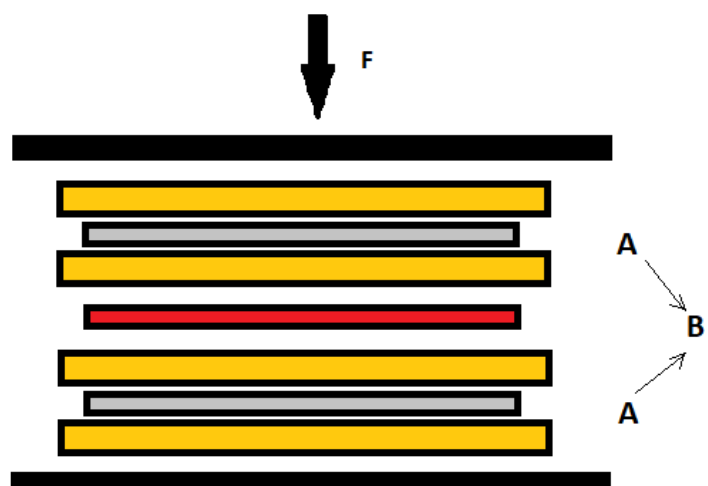
Obrázek 59 – Schéma výroby a skladby laminátu A

9.3.5.2 Způsob č. 1

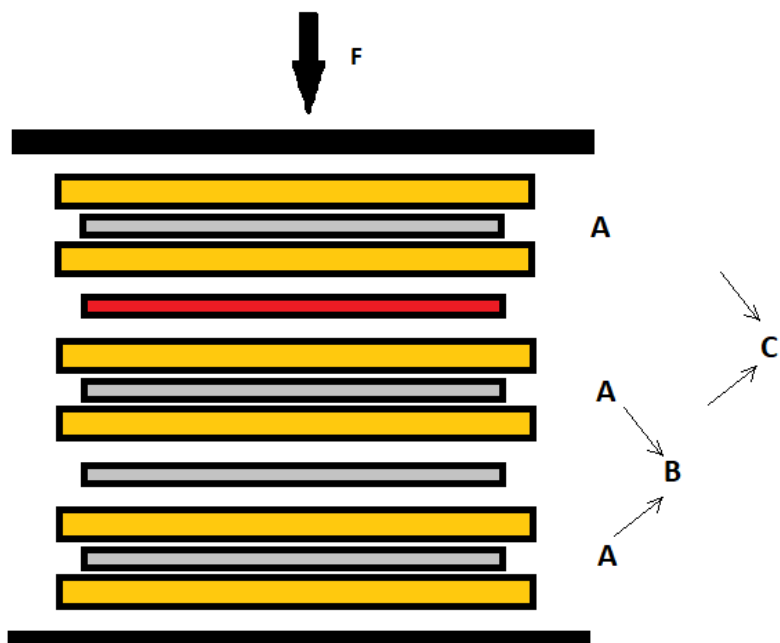
První způsob je založený na vrstvení tenkých A laminátů na sebe. Při působení tepla a tlaku se spojí dva A lamináty (Obrázek 60) v jeden, značený jako B (Obrázek 61). Na B laminát se znovu položí laminát A a tímto spojením vznikne laminát C (Obrázek 62). Opětovným položením laminátu A na laminát C vznikne finální laminát značený D (Obrázek 63), který tvoří PE prášek a celkem 8 vrstev tkaniny. Údaje o teplotách jsou pro plátňovou vazbu uvedeny v Tabulkách 31 a 32 a pro keprovou v Tabulkách 33 a 44.



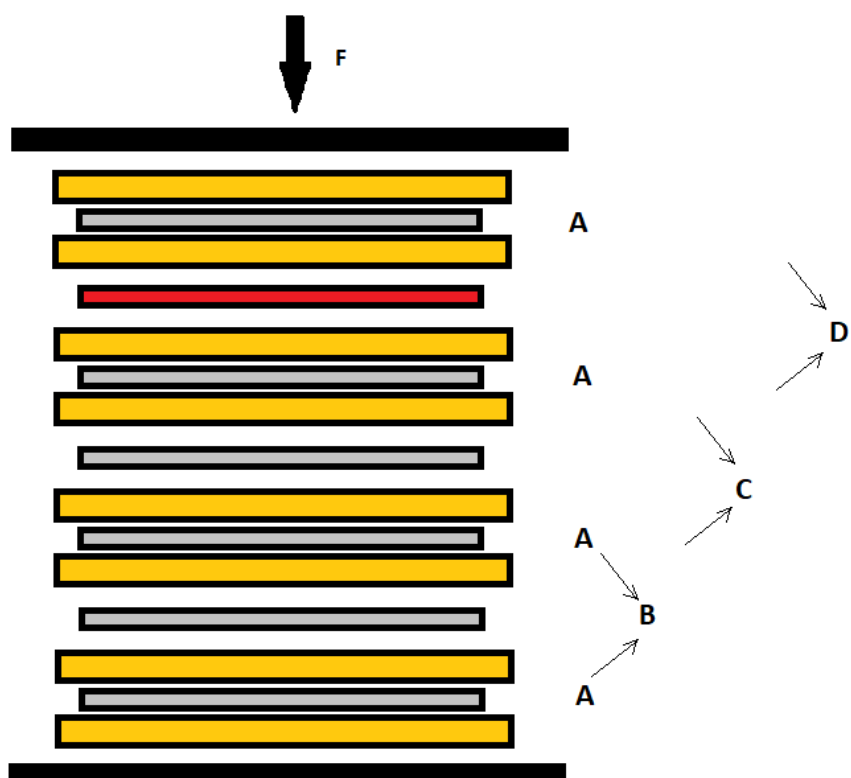
Obrázek 60 – Způsob č. 1 – krok 1 - laminát A



Obrázek 61 – Způsob č. 1 – krok 2 - laminát B



Obrázek 62 - Způsob č. 1 - krok 3 - laminát C



Obrázek 63 - Způsob č. 1 - krok 4 - laminát D

Čedičová tkanina plátňová vazba

Teplota vyhřívání desky: 170°C

Tabulka 31 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků A (čedičová tkanina plátňové vazby)

Způsob kladení vrstev	Naměřená teplota po vytvoření spoje [°C]
A ₁	168
A ₂	154
A ₃	160
A ₄	170

Tabulka 32 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků B (čedičová tkanina plátňové vazby)

Způsob kladení vrstev	Naměřená teplota po vytvoření spoje [°C]
A ₁ + A ₂ = B ₁	176
B ₁ + A ₃ = C ₁	174
C ₁ + A ₄ = D	186

Čedičová tkanina keprová vazba

Teplota vyhřívání desky: 192°C

Tabulka 33 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků A (čedičová tkanina keprové vazby)

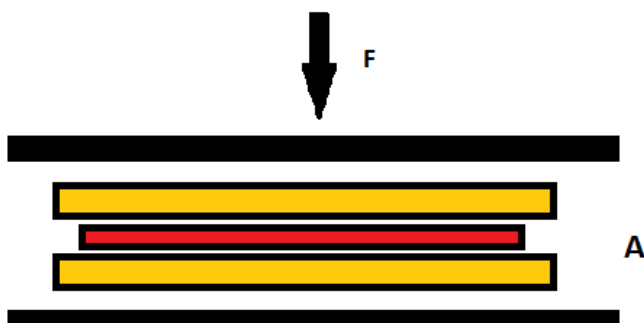
Způsob kladení vrstev	Počet vrstev tkaniny	Naměřená teplota po vytvoření spoje [°C]
A ₁	2	183
A ₂	2	166
A ₃	2	156
A ₄	2	158

Tabulka 34 - Tabulka 25 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků B (čedičová tkanina keprové vazby)

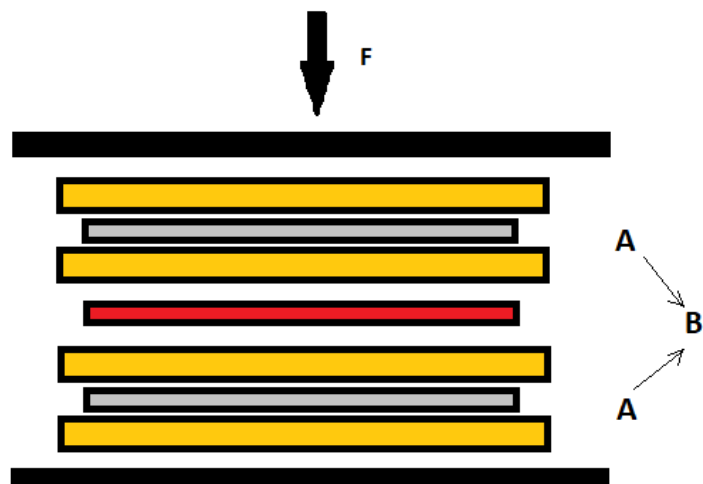
Způsob kladení vrstev	Počet vrstev tkaniny	Naměřená teplota po vytvoření spoje [°C]
$A_1 + A_2 = B_1$	4	197
$B_1 + A_3 = C_1$	6	187
$C_1 + A_4 = D$	8	181

9.3.5.3 Způsob č. 2

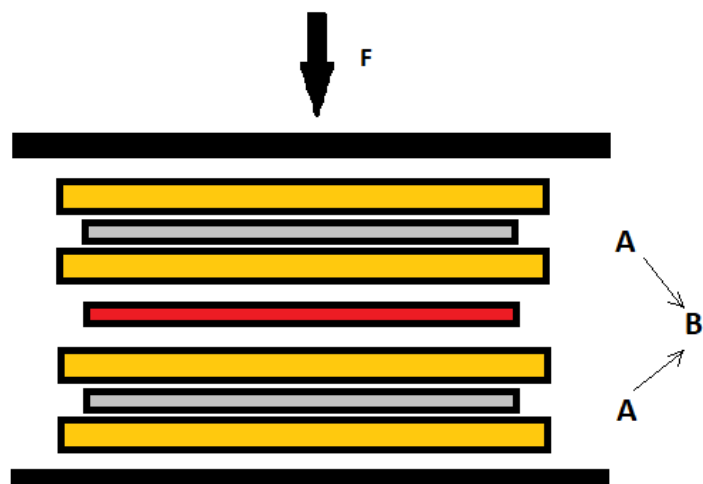
Druhý způsob je podobný způsobu prvnímu. Spojí se vždy dva předpřipravené lamináty A (Obrázek 64), aby bylo výsledkem spojení v laminát B (Obrázek 65). Tento krok je stejný jako ve způsobu č. 1. Stejným procesem dojde k vytvoření i druhého B laminátů (Obrázek 66). Takto vyrobené B lamináty se opět spojí a vznikne tak laminát o celkem osmi vrstvách tkaniny označený D, který je výsledným laminátem (Obrázek 67). Teploty při výrobě vzorků ukazují Tabulky 35 až 38.



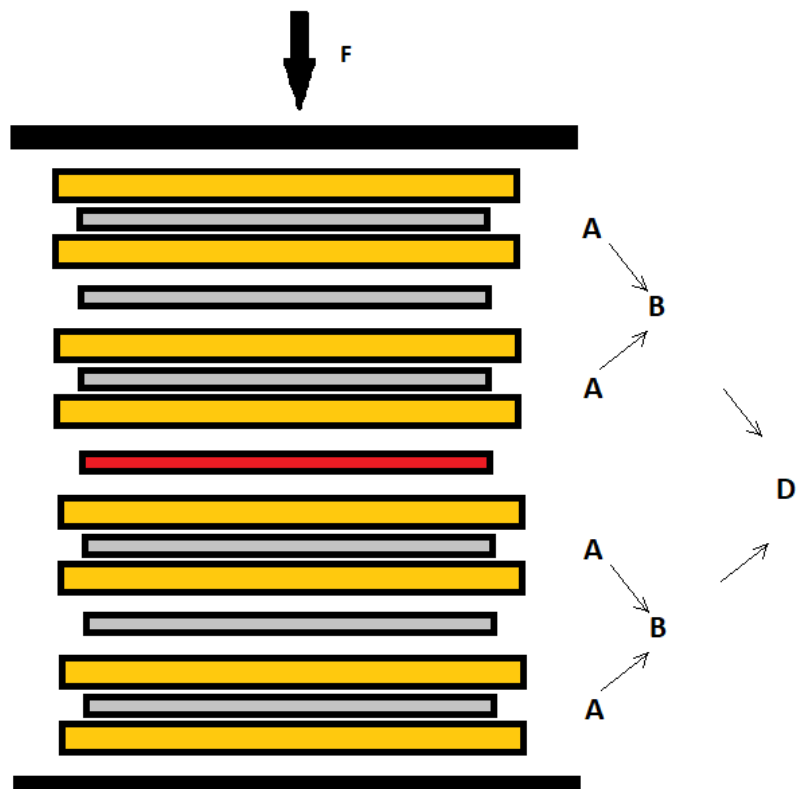
Obrázek 64 - Způsob č. 2 - krok 1 - laminát A



Obrázek 65 - Způsob č. 2 - krok 2 - laminát B



Obrázek 66 - Způsob č. 2 - krok 3 - laminát B



Obrázek 67 - Způsob č. 2 - krok 4 - laminát D

Čedičová tkanina plátňová vazba

Teplota vyhřívání desky: 175°C

Tabulka 35 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků A (čedičová tkanina plátňové vazby)

Způsob kladení vrstev	Počet vrstev tkaniny	Naměřená teplota po vytvoření spoje [°C]
A ₁	2	169
A ₂	2	168
A ₃	2	172
A ₄	2	174

Tabulka 36 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků B (čedičová tkanina plátnové vazby)

Způsob kladení vrstev	Počet vrstev tkaniny	Naměřená teplota po vytvoření spoje [°C]
$A_1 + A_2 = B_1$	4	195
$A_3 + A_4 = B_2$	4	182
$B_1 + B_2 = D$	8	185

Čedičová tkanina keprová vazba

Teplota vyhřívání desky: 200°C

Tabulka 37 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků A (čedičová tkanina keprové vazby)

Způsob kladení vrstev	Počet vrstev tkaniny	Naměřená teplota po vytvoření spoje [°C]
A_1	2	158
A_2	2	171
A_3	2	176
A_4	2	175

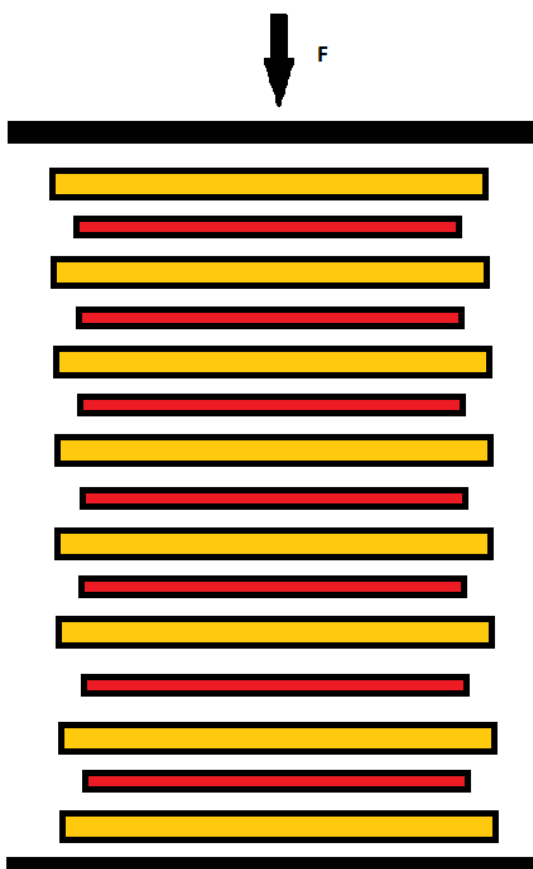
Tabulka 38 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků B (čedičová tkanina keprové vazby)

Způsob kladení vrstev	Počet vrstev tkaniny	Naměřená teplota po vytvoření spoje [°C]
$A_1 + A_2 = B_1$	4	188
$A_3 + A_4 = B_2$	4	185
$B_1 + B_2 = D$	8	190

9.3.5.4 Způsob č. 3

Třetí způsob obnáší položení všech osmi vrstev tkaniny na sebe, střídavě s PE práškem (Obrázek 68). Za působení tepla a tlaku dojde ve spojení všech osmi kusů

tkaniny naráz v jeden celek – laminát značený D. Při tomto způsobu se nepoužívají předpřipravené A lamináty jako u předešlých způsobů. Údaje o teplotách jsou v Tabulce 39.



Obrázek 68 - Způsob č. 3

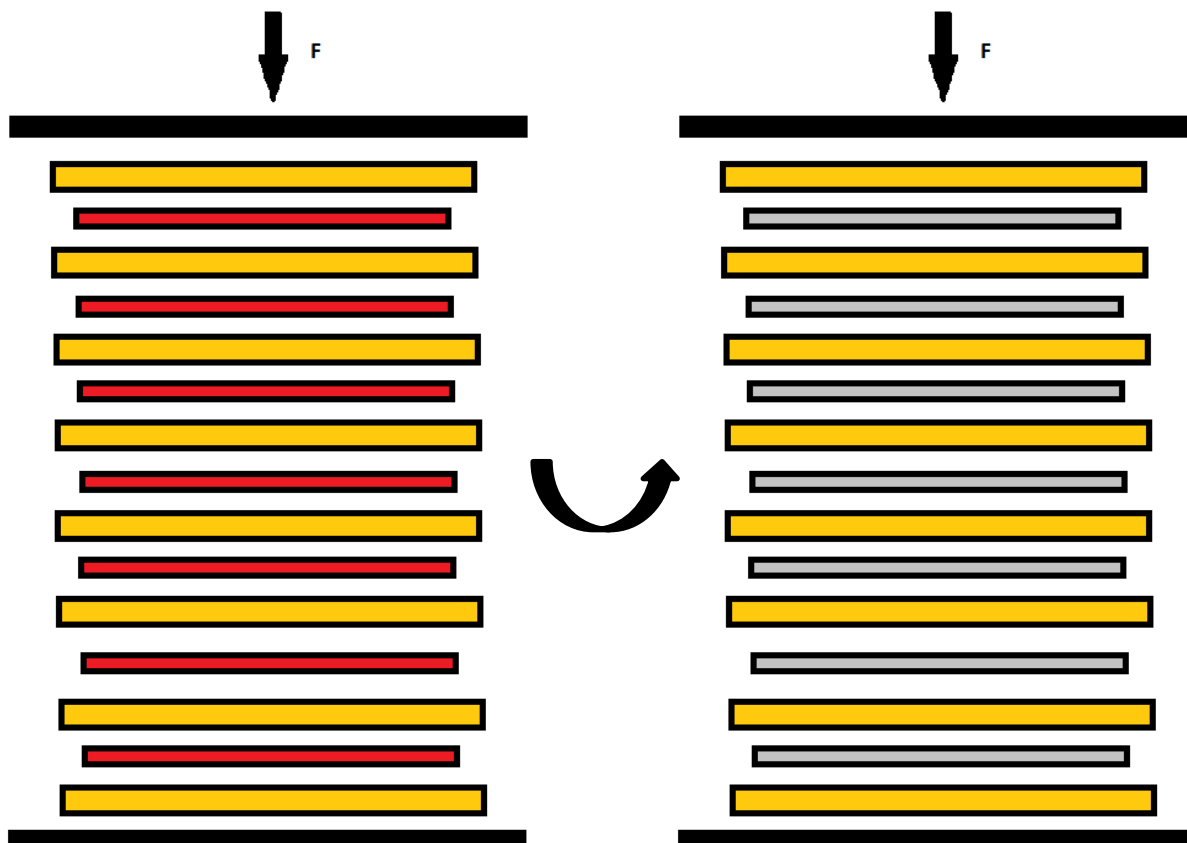
Tabulka 39 – Teploty vyhřívání desky a laminátu u způsobu č. 3

Typ tkaniny	Teplota vyhřívání desky [°C]	Teplota laminátu při ohřátí z jedné strany [°C]
Čedičová plátnové vazby	180	169
Čedičová keprové vazby	184	199

9.3.5.5 Způsob č. 4

Čtvrtý způsob vychází ze způsobu č. 1. První krok je stejný, kdy se navrství kusy tkaniny a mezi ně PE prášek. Po lisování vzniká laminát D. Nyní se však laminát otočí a dojde opět k lisování za působení tepla a tlaku. Tím by mělo být zaručeno lepší natavení

prášku v původně odlehlých částech vzorku a tím i lepší spojení vláken a matrice. Způsob č. 4 je znázorněn na Obrázku 69. Údaje o teplotách jsou v Tabulce 40.



Obrázek 69 - Způsob č. 4 – krok 1 a krok 2

Tabulka 40 - Teploty vyhřívání desky a laminátu u způsobu č. 4

Typ tkaniny	Teplota vyhřívání desky [°C]	Teplota laminátu při ohřátí z jedné strany [°C]	Teplota laminátu při ohřátí z druhé strany [°C]
Čedičová plátňové vazby	200	192	188
Čedičová keprové vazby	180	197	189

9.3.6 Zjišťování adheze mezi vrstvami laminátu pozorováním na mikroskopu

K vyhodnocení kvality spojení matrice a výztuže způsoby zmíněnými v předchozím textu byly zhotoveny výbrusy z vyrobených laminátů. Ty byly pozorovány na mikroskopu s polarizovaným světlem. Lamináty byly nejprve nařezány ruční pilkou, zality zalévací hmotou a broušeny na automatické brusce (Tabulka 41). Parametry broušení udává Tabulka. Na snímcích byly pozorovány hlavně vzniklé dutiny a matricí neprosycená vlákna. Zvětšení byla zvolena 50x a 100x.

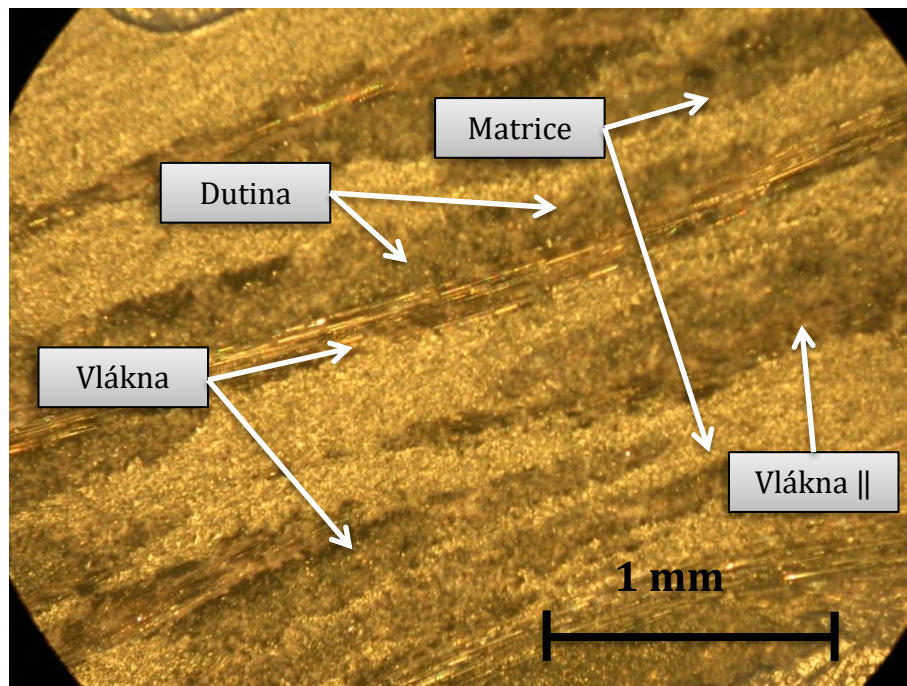
Podle snímků můžeme určit, při kterém způsobu výroby vzorků docházelo ke vzniku dutin a malému prosycení vláken. Pro optimalizaci výroby laminátů by měl být zvolen takový způsob, kdy je vznik zmíněných vad nejmenší.

Tabulka 41 - Parametry broušení vzorků pro pozorování na mikroskopu

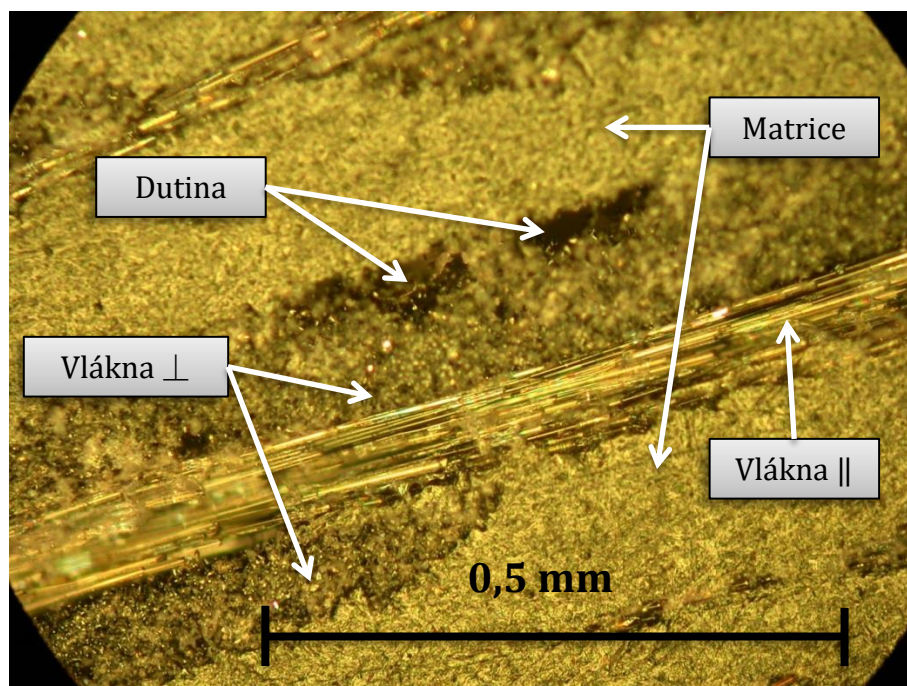
Chlazení	Voda
Rychlost broušení [ot.min ⁻¹]	200
Označení brusného papíru	180
Čas broušení [min]	3 x 6 min
Zatížení	10 £ (4,536 kg)

9.3.6.1 Způsob č. 1

Snímky na Obrázku 70 a 71 byly pořízené z výbrusů laminátů vyrobených způsobem č. 1, konkrétně těch vyztužených plátnovou vazbou. Na Obrázku 72 jsou vidět dutiny. Vznikly zřejmě nedostatečným proniknutím PE prášku mezi vyztužující vlákna. U keprové vazby byly snímky obdobné, proto zde nejsou uvedeny.



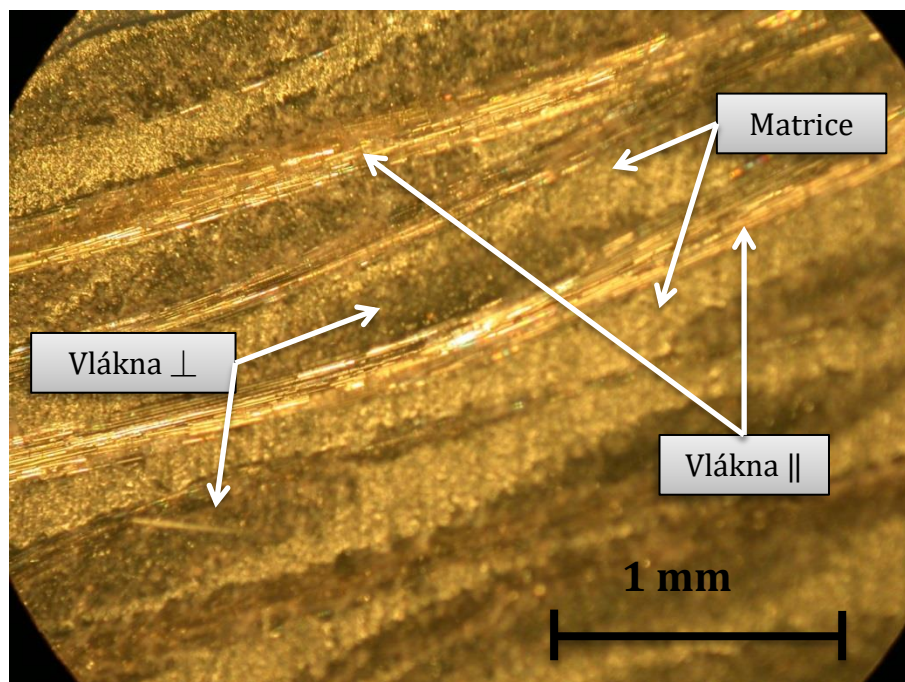
Obrázek 70 - Způsob č. 1 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE



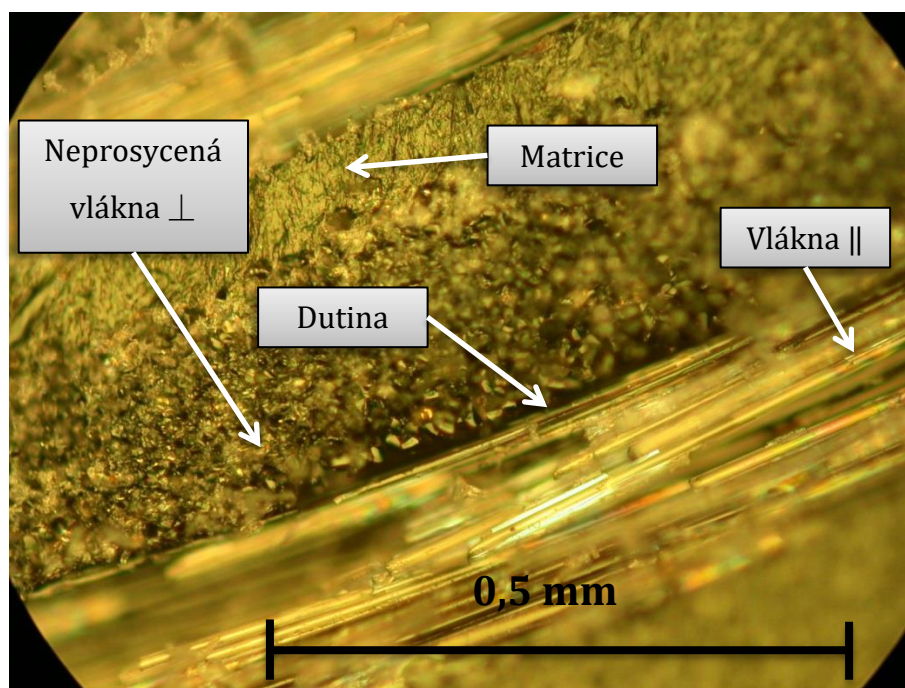
Obrázek 71 - Způsob č. 1 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE

9.3.6.2 Způsob č. 2

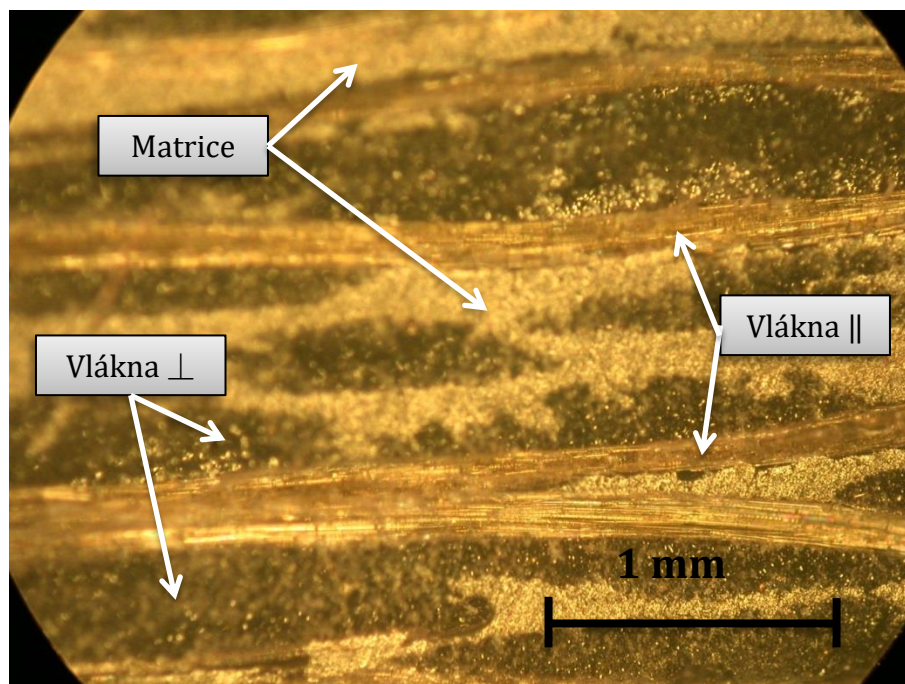
Na Obrázcích 72 až 75 vidíme výbrusy z laminátů vyrobených způsobem č. 2. První dva snímky obsahují vazbu plátňovou, ostatní keprovou. Opět vidíme špatné prosycení vláken matricí a dutiny.



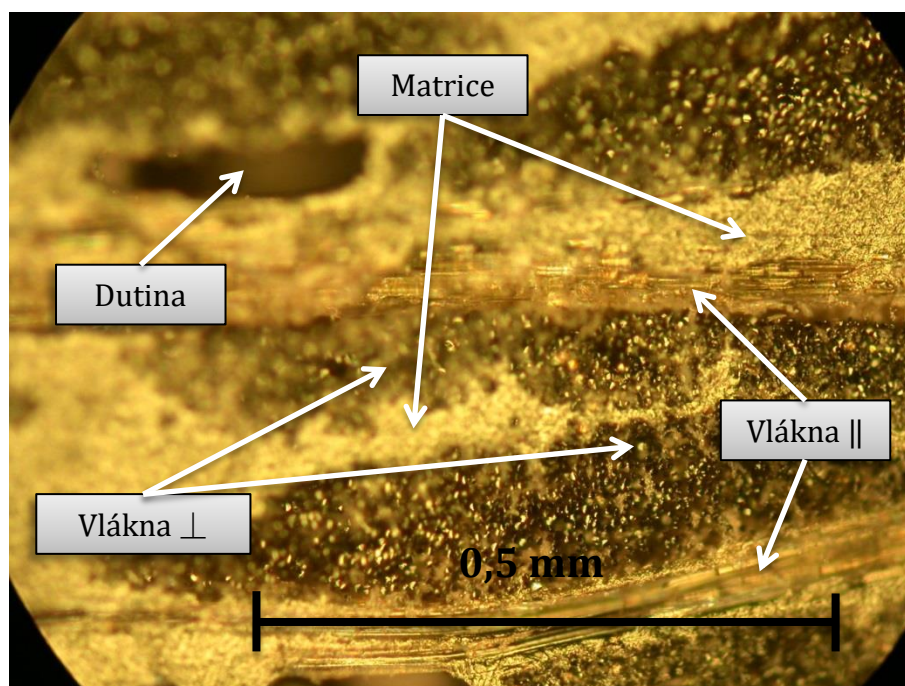
Obrázek 72 - Způsob č. 2 - Čedičová tkanina plátňové vazby a PE



Obrázek 73 - Způsob č. 2 - Čedičová tkanina plátňové vazby a PE



Obrázek 74 - Způsob č. 2 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE

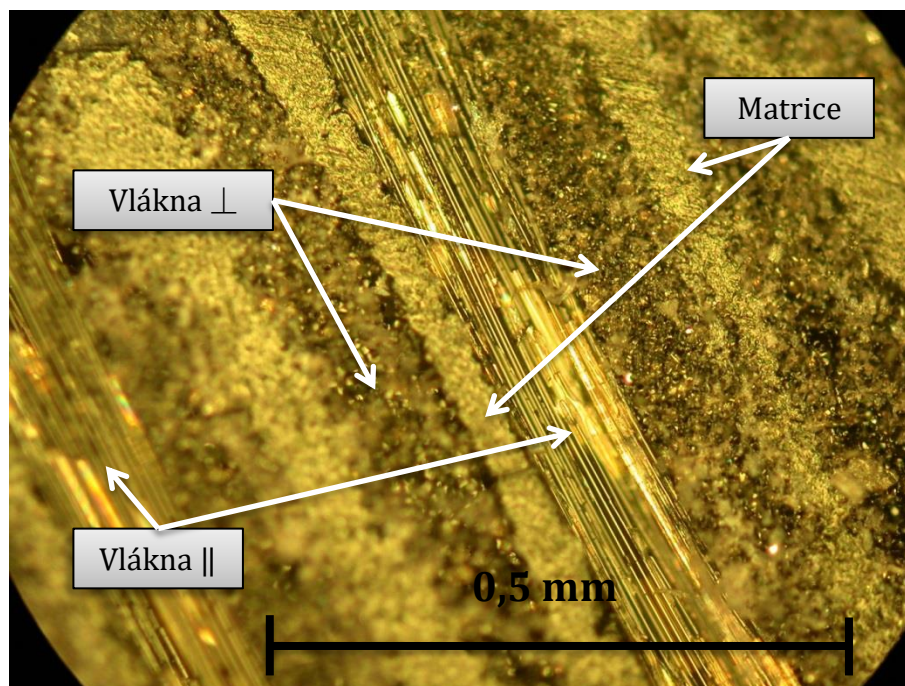


Obrázek 75 - Způsob č. 2 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE

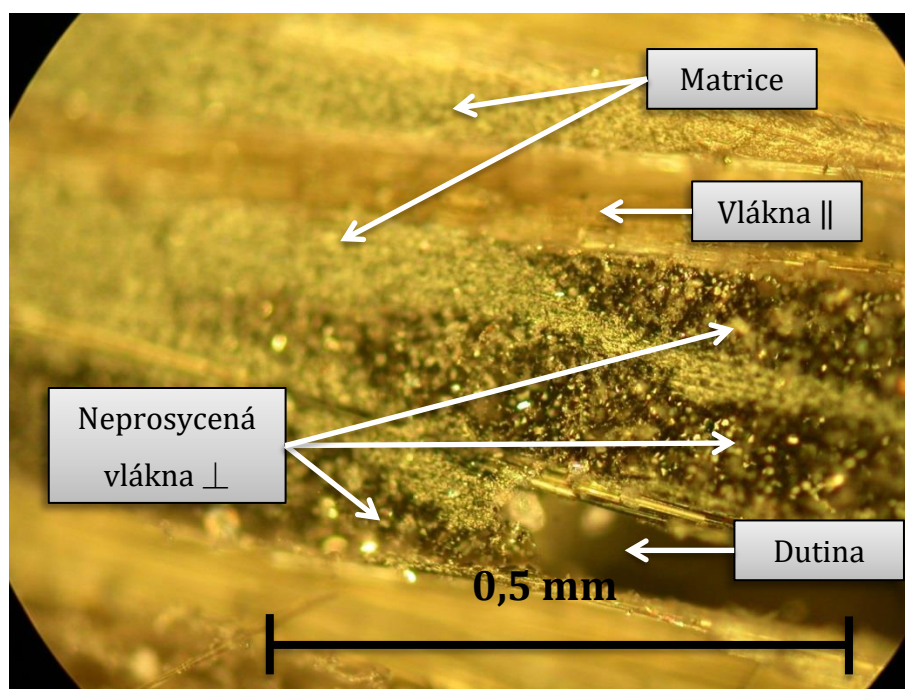
9.3.6.3 Způsob č. 3

Na Obrázcích 76 až 79 jsou fotografie z dalších výbrusů (způsob č. 3). Z Obrázků 78, 79 a 80 je jasné, že je tato výrobní metoda nejméně vhodná a výsledky jsou

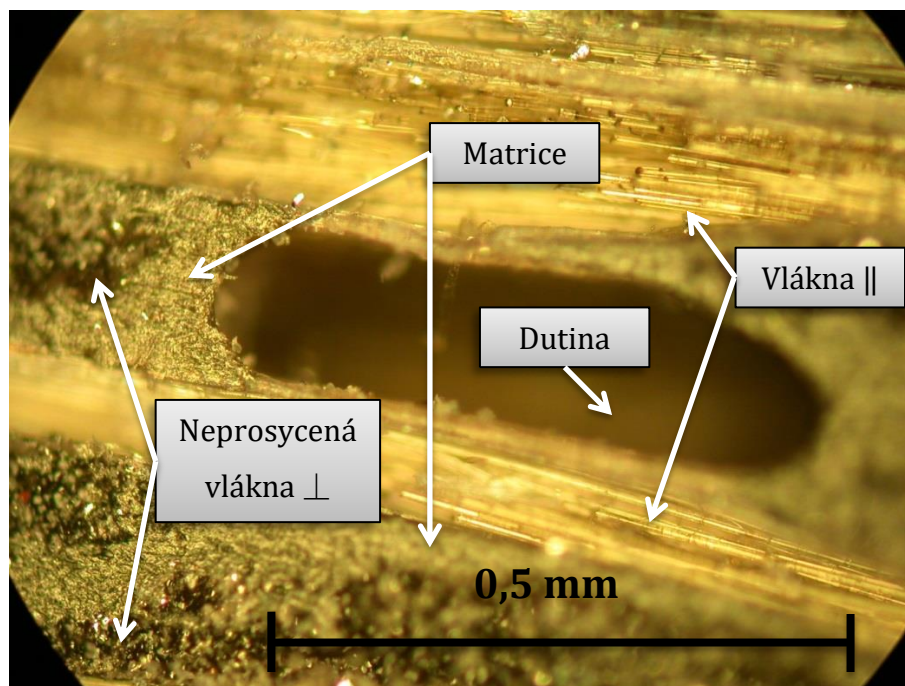
absolutně nejhorší ze všech zvolených způsobů, protože vznikly obrovské dutiny. Jejich vznik byl důsledkem ohřátí velkého množství vrstev tkaniny a PE prášku naráz a to pouze z jedné strany.



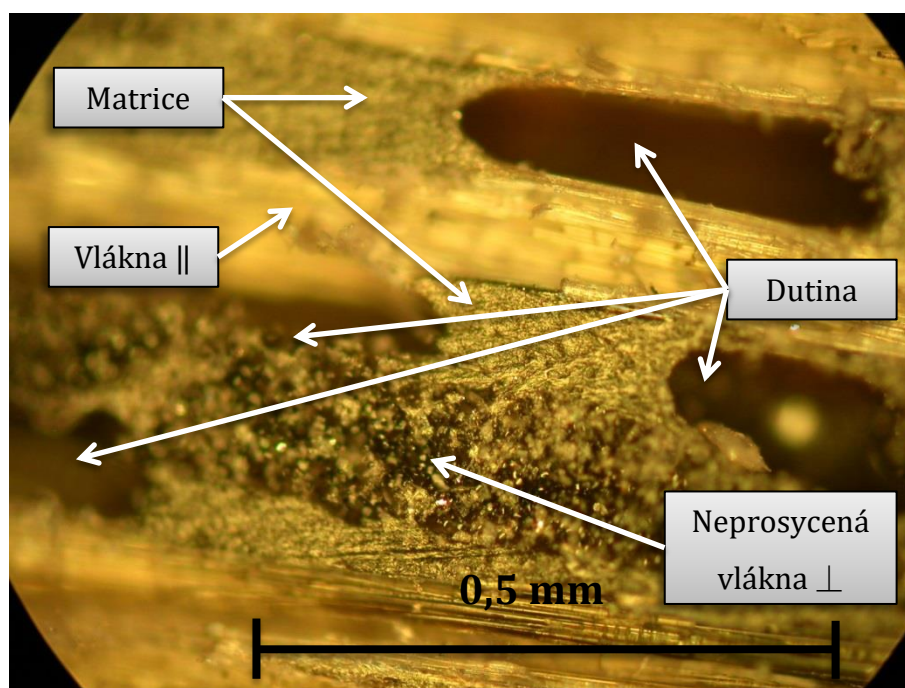
Obrázek 76 Způsob č. 3 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE



Obrázek 77 - Způsob č. 3 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE



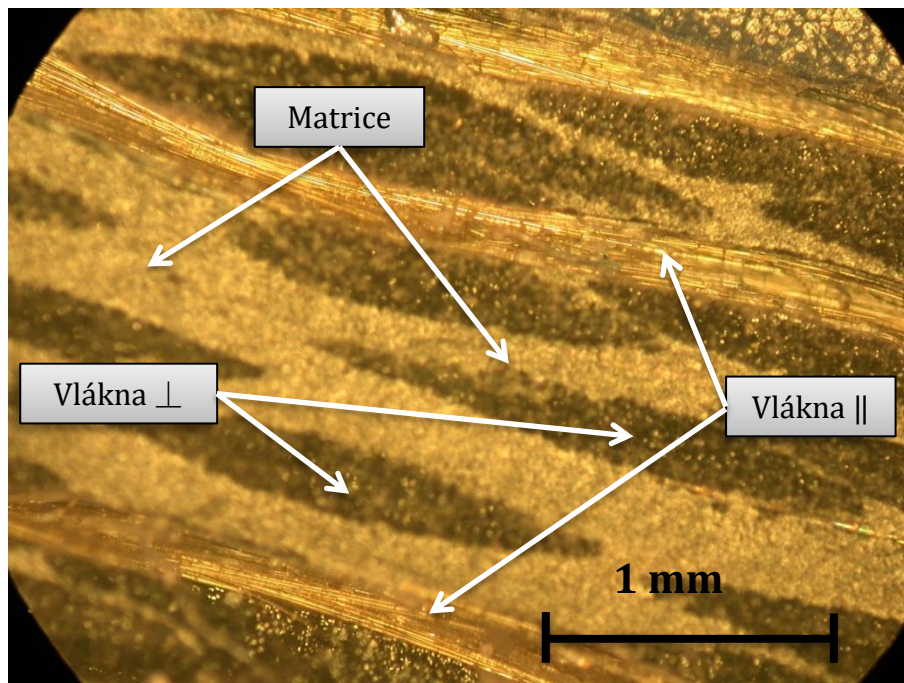
Obrázek 78 - Způsob č. 3 - Čedičová tkanina kevrové vazby a PE



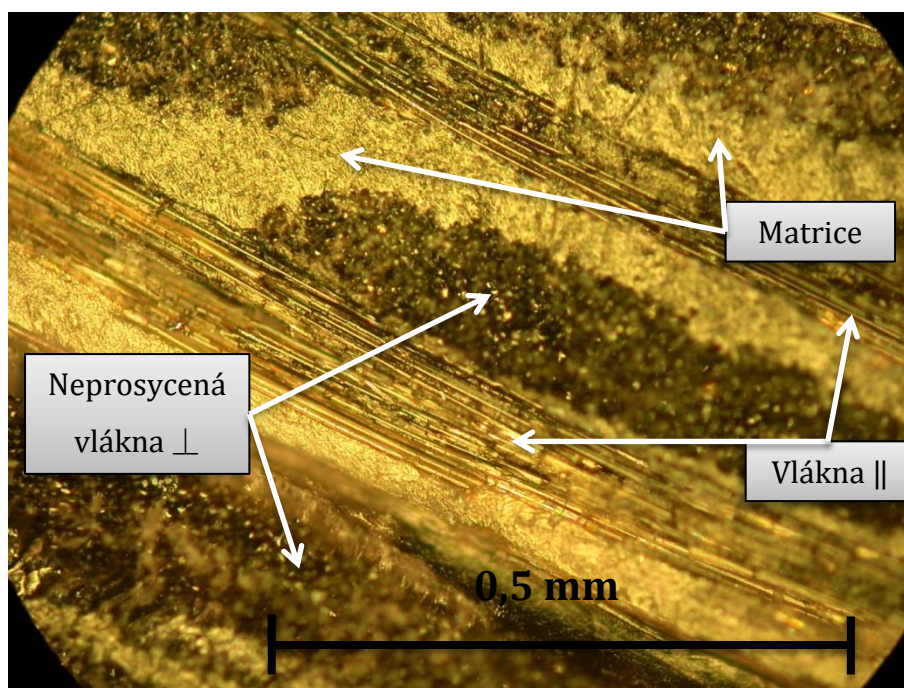
Obrázek 79 - Způsob č. 3 - Čedičová tkanina kevrové vazby a PE

9.3.6.4 Způsob č. 4

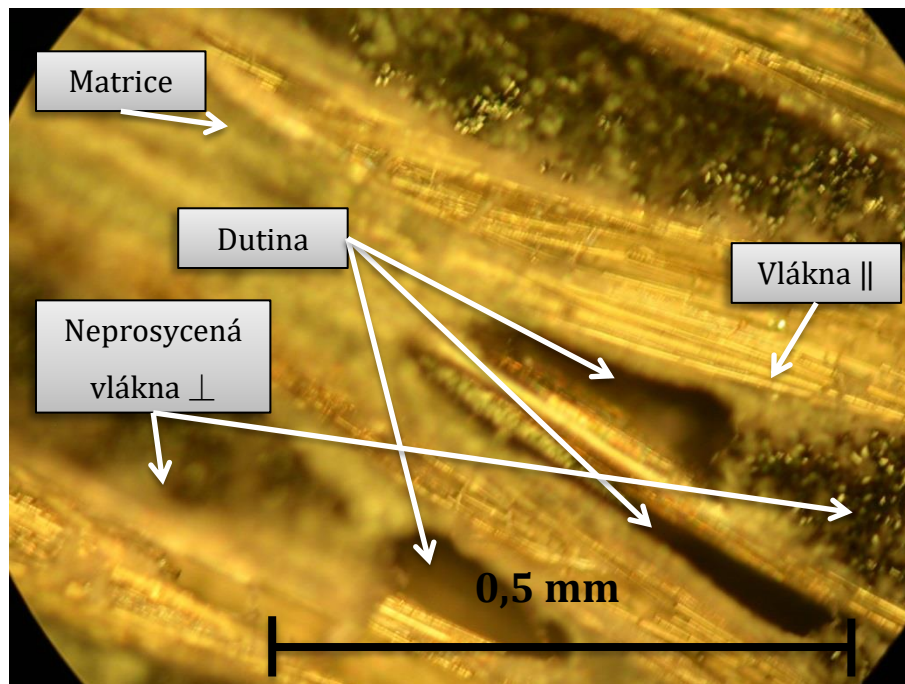
Způsob č. 4 opět vedl ke vzniku dutin. Jejich množství a velikost byla menší, než u způsobu č. 3, i přes to tento způsob není pro další výrobu laminátů doporučen (Obrázky 80 až 83).



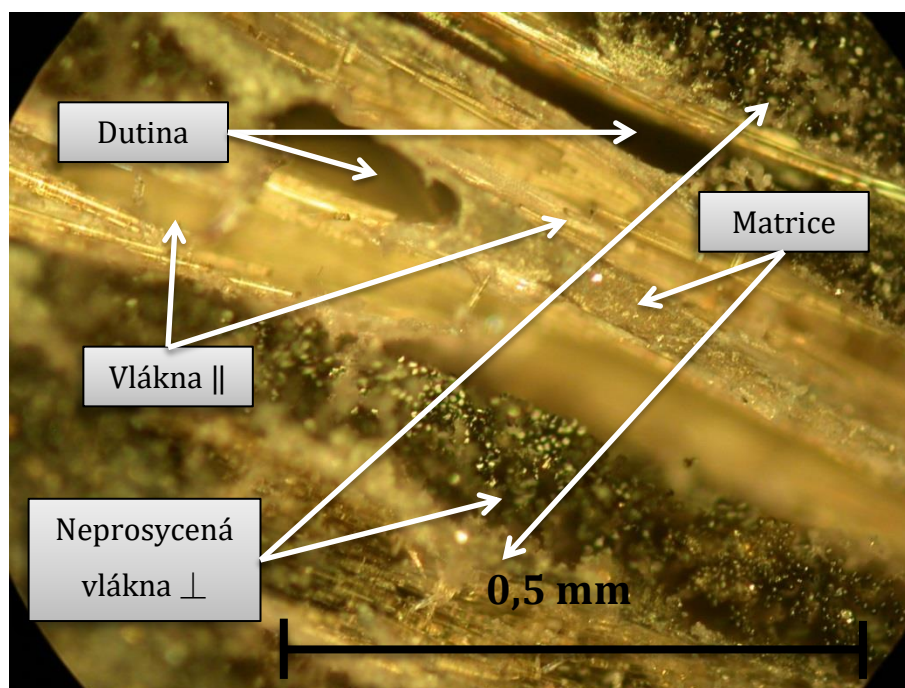
Obrázek 80 - Způsob č. 4 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE



Obrázek 81 - Způsob č. 4 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE



Obrázek 82 - Způsob č. 4 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE

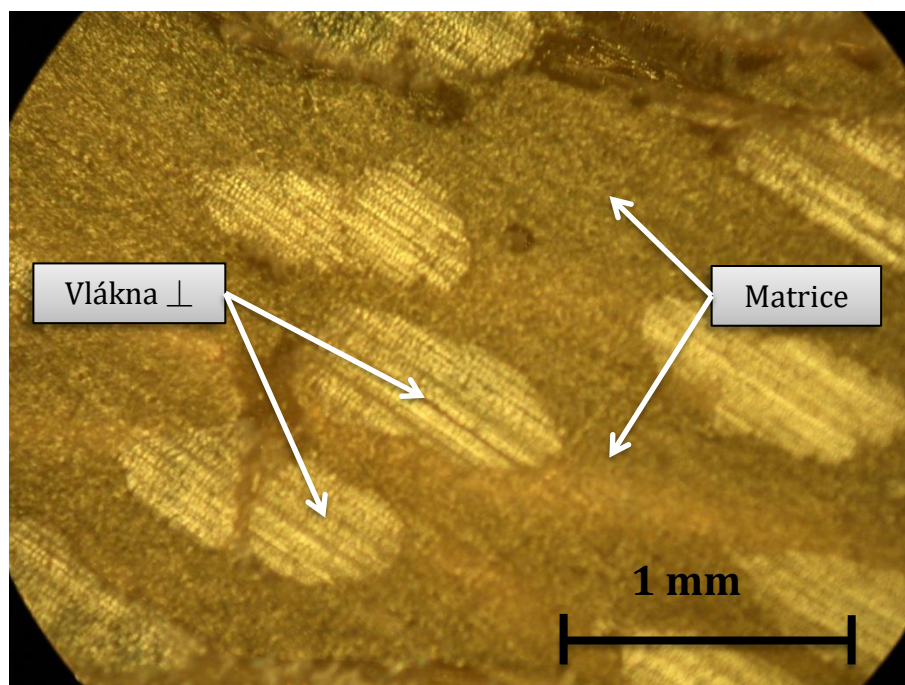


Obrázek 83 - Způsob č. 4 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE

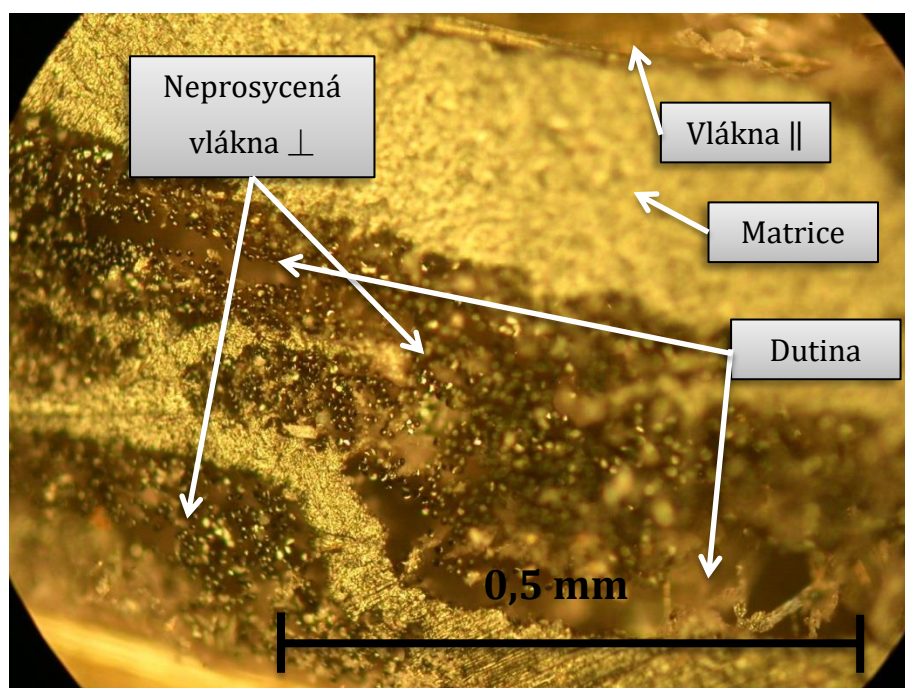
9.3.6.5 Další pozorování na mikroskopu

Dále proběhlo pozorování:

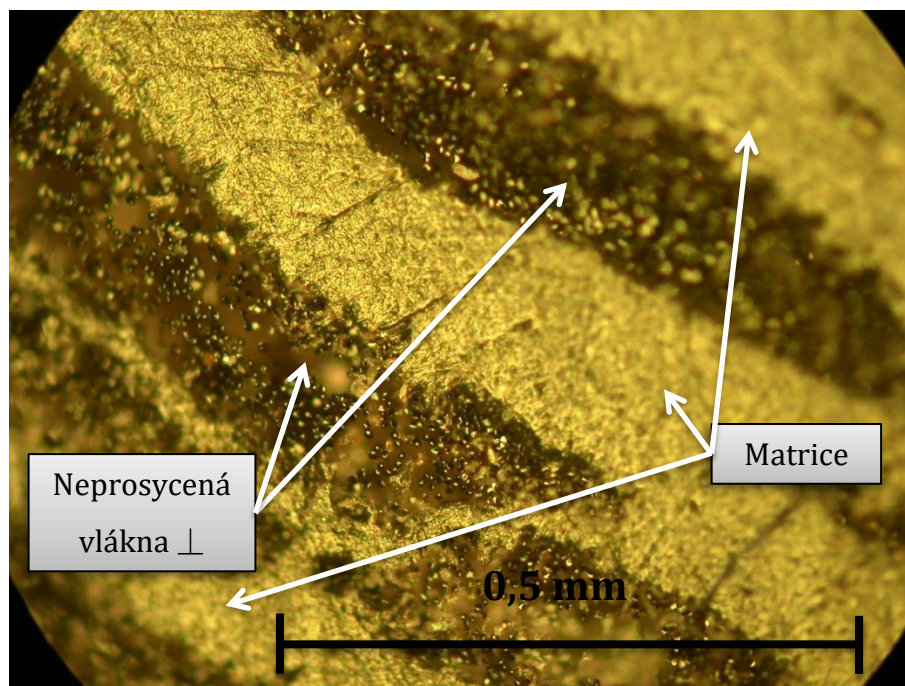
- výbrusu laminátu z kevlarové tkaniny plátnové vazby (Obrázek 84)
- výbrusu laminátu ohnutého za pokojové teploty z čedičové tkaniny plátnové vazby (Obrázek 85 a 86).



Obrázek 84 - Kevlarová tkanina plátnové vazby a PE



Obrázek 85 - Ohybem deformovaný vzorek z čedičové tkaniny plátnové vazby a PE



Obrázek 86 - Ohybem deformovaný vzorek z čedičové tkaniny plátnové vazby a PE

U ohnutých laminátů na Obrázcích 85 a 86 došlo po ohnutí vzorku k porušení adheze mezi matricí a výztuží. Vidíme mezery (dutiny) mezi samotnými vlákny a mezi vlákny a matricí.

10 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Po úvodním seznámení s problematikou prepregů všeobecně byla vypracována teoretická část práce. Hlavní kapitoly se věnovaly výztuži a matici kompozitních materiálů (a konkrétně prepregů), výrobním metodám prepregů a zkouškám mechanických vlastností. Některé normy zkoušek autorka vybrala pouze pro inspiraci k vytvoření vzorků a postupu testování dle vlastního uvážení, z jiných přímo vycházela. Nastudování teoretických informací vedlo k vytvoření praktické části práce a sestavení plánu výroby vzorků a jejich testování.

Na ÚMI Fakulty strojní ČVUT v Praze se odehrála veškerá praktická výroba a zkoušení. Byly vytvořeny prepregy z čedičové i kevlarové tkaniny s termoplastickou maticí, konkrétně polyethylenovou. Výsledky jednotlivých výrobních postupů a zkušebních metod udává předchozí text.

Jelikož nebylo v rámci tvorby této práce z časových důvodů a rozsáhlosti samotné práce možno vytvořit více zkušebních těles více výrobními postupy a jejich odzkoušení více zkušebními metodami, navrhuje nyní autorka práce na základě svých vlastních zkušeností a získaných poznatků následující doporučení pro navázání na dané téma a tuto diplomovou práci.

Hlavní získané poznatky autorky:

- **Špatná dostupnost technických parametrů v oblasti výroby prepregů v internetových a knižních zdrojích**

Firmy vyrábějící prepregy si chtějí zřejmě uchovat technické parametry jejich výroby v tajnosti jako své „know – how“ a je obtížné tyto údaje dohledat.

- **Odlíšný typ vazby tkaniny**

Typ vazby tkaniny (plátňová/keprová) nemá znatelný vliv na samotnou výrobu prepregů a laminátů. Prosycení vláken je v našem případě přibližně stejné, liší se však naměřené hodnoty mechanických vlastností.

- **PE prášek s vyšší hodnotou indexu viskozitního toku taveniny**

Použitý prášek s vyšší hodnotou indexu viskozitního toku taveniny je vhodnější z hlediska lepšího smáčení matrice a nižší hodnoty teploty tavení.

- **Nasákavost kevlaru**

U nasáklých vzorků s kevlarovou tkaninou byly naměřeny téměř stejné hodnoty modulů pružnosti v ohybu, jako u nenasáklých vzorků. Nasákavost v našem případě zřejmě příliš neovlivňuje konkrétní mechanické vlastnosti tohoto polymeru, což mohlo být způsobeno dutinami v kompozitu.

- **Nejlepší a nejhorší způsob tvorby laminátů**

Mezi způsobem č. 1 a 2 nejsou podle pořízených snímků z mikroskopu velké rozdíly. Preferován je však způsob č. 1, kdy se na sebe vrství postupně tenké lamináty až do požadované tloušťky vzorku. Vrstvy k sobě lépe přilnou. Naprosto je nevhodný způsob 3., kterému je podobný způsob 4. U obou těchto způsobů vznikají velké dutiny důsledkem špatného prohrátí vzorku v celém jeho objemu.

Doporučení autora jsou:

- **Používání ochranných pomůcek (brýle, rukavice, plášť a respirátor)**

Čedičová tkanina se podobá skelné. Vlákna se rozpadají na velmi malé délky, zapichují se do oděvu a rukou, je možné je vdechnout, anebo se dostávají do očí ať už ze vzduchu nebo znečištěných rukou. Pro ochranu oděvu je doporučen plášť a rukou kvalitnější rukavice, kterými vlákna neproniknou. Plastové rukavice jsou nevhodné z hlediska své malé teplotní odolnosti a hrozby roztavení a poranění rukou. Navíc jsou jimi vlákna schopna proniknout a dostat se k pokožce rukou. Pro ochranu dýchacích cest je doporučen respirátor a očí ochranné brýle. Při tavení polymerního prášku navíc vzniká nepříjemný a nezdravý zápach. U práce s kevlarovou tkaninou je použití ochranných pomůcek na vlastím uvážení, protože nedochází k jejímu rozpadu na malá ostrá vlákna.

- **Fixování okrajů tkaniny**

Pro konkrétní případy je lepší okraje tkaniny fixovat, protože dochází k jejímu rozpadu, což významně ztěžuje manipulaci a dochází k jejímu znehodnocování. Byla použita textilní páska s lepidlem, která je však málo teplotně odolná a při vyšších teplotách se lepidlo roztaví a při špatné manipulaci se páska z tkaniny odlepuje. Bylo by proto lepší najít vhodnější prostředek pro fixaci okrajů tkaniny.

- **Používání speciálního nářadí a přístrojů**

Tkaninu je vhodné stříhat na menší díly, klasické nůžky na papír toho však nejsou schopny. Je proto nutné použít speciální nůžky a taktéž pilku, kterou lze řezat vyrobené lamináty. Stříhání kevlarové tkaniny je obtížnější, než čedičové.

Lamináty byly řezány ručně s upnutím ve svěráku, což jednak vede k deformaci samotného vzorku a dále k jeho nepřesnému rozměru. S tím souvisí ohýbání laminátu za studena při pokojové teplotě, protože jak bylo vidět na snímcích z mikroskopu, vlákna se oddělují od matrice, vznikají dutiny, narušuje se adheze a vzorek se nenávratně deformuje. Pro příště by bylo vhodnější lamináty řezat na automatické pile, aby se předešlo zmíněným problémům a dosáhlo přesného tvaru a rozměrů.

- **Použití PE prášku s vyšší hodnotou indexu viskozitního toku taveniny**

Prášek po roztavení lépe smáčí vlákna, taje při nižší teplotě a práce s ním je při tvorbě kompozitů snadnější.

- **Použití jemnějšího PE prášku**

Dalším doporučením je vyzkoušet ještě jemnější PE prášek (s menší velikostí zrn), pokud je takový prášek k dispozici. Velikost zrn by měla být vždy menší než mezera mezi vlákny v rovingu, aby se zrna byla schopna se mezi jednotlivá vlákna dostat. Čím menší zrna prášku, tím snadnější by mělo proniknutí být. Není problém prosytit mezery mezi rovingy, mezery mezi vlákny však ano, což je vidět i na pořízených fotografiích z mikroskopu.

- **Použití tkaniny s jinou hustotou rovingů**

Na trhu existuje mnoho druhů vazeb tkanin. Některé vazby nejsou tak husté jako ty, které mají menší počet rovingů na plochu. Hustota rovingů bude jistě ovlivňovat

mechanické vlastnosti prepregů a laminátů z nich vyrobených, proto by bylo vhodné vyzkoušet použití tkaniny s jinou hustotou rovingů, než momentálně použítá.

- **Použití lisu (s vyhříváními deskami z obou stran)**

Dosavadní výroba prepregů a laminátů probíhala pouze ručně. Pro zrychlení a zdokonalení výroby by bylo vhodné proces mechanizovat a použít lis. Při ruční výrobě se špatně dodržují konstantní podmínky jako teplota, tlak a čas. Metoda je však pro první kroky vývoje jistě vhodná. Použití lisu by výrobu zrychlilo a zkvalitnilo právě kvůli dodržení stále stejných podmínek (tlak, teplota a čas).

Vzhledem k tomu, že se z odzkoušených výrobních postupů jako nejméně vhodný jeví způsob č. 3, kdy je ohřev laminátu pouze jednostranný a je spojováno více vrstev tkaniny a PE prášku současně, je doporučeno u lisu vyhřívát obě desky, bude – li to možné, anebo alespoň následně vzorek otočit a ohřát i z druhé strany.

- **Změna teploty, tlaku a času**

Pro lepší prosycení výztuže maticí, zhutnění samotného kompozitu a dosažení lepších mechanických vlastností by měly být hodnoty tlaků, teplot a časů vyšší, v čemž by mělo použití lisu pomoci.

- **Zkouška tahem a rázem v ohybu**

Zkušební metody by mohly být rozšířeny o zkoušku tahem a rázem v ohybu. Zkouška rázem v ohybu (metoda Charpy) by mohla být provedena hlavně u vzorků z kevlarové tkaniny, protože kevlar je známý hlavně pro své použití ve vojenské výstroji (helmy, vesty, apod.), protože má velmi dobrou schopnost pohlcovat rázovou energii a tudíž chrání vojáky před zásahem letící kulky.

- **Záměna PE v jiný termoplast**

Mohla by být vyrobena a odzkoušena tělesa s jinou termoplastovou maticí, než s polyethylenovou pro porovnání hodnot mechanických vlastností.

- **Opakování měření třibodového ohybu nasáklých vzorků s kevlarovou tkaninou**

Jelikož byl na třibodový ohyb zkoušen pouze jeden nasáklý vzorek vyztužený kevlarovou tkaninou a hodnota E – modulu v ohybu vyšla vyšší, než průměrná hodnota

nenasáklých vzorků, bylo by vhodné měření opakovat a to s použitím více zkušebních těles.

- **Zlepšení povrchu výbrusů**

Pro mikroskopické pozorování by měly mít povrchy vzorků co nejlepší drsnost povrchu. Té není těžké dosáhnout u materiálů jako je ocel nebo různé druhy slitin. U kompozitních materiálů není tak obtížné kvalitně vybrousit matrici jako výztuž, jejíž povrch není rovný a jednolitý. Hloubka ostrosti potom neumožňuje pozorování vybroušené plochy kompozitu při vyšších zvětšeních. Snímky jsou rozmazané a zaostřeny jsou vždy jen jejich velmi malé části. Výbrusy by měly být příště připraveny lépe, měl by být na závěr použit jemnější brusný papír a emulze, aby nevznikaly rýhy a stopy po brusných zrnech, které znehodnocují pořízené fotografie. Díky tomu by mohlo být také možné vzorky pozorovat při větších zvětšeních. Otázkou zůstává, zda broušená výztuž nebude sama působit jako brusivo.

Závěr:

Cíle práce byly splněny:

- Proběhlo seznámení s problematikou přípravy prepregů.
- S použitím stávajícího vybavení bylo navrženo zhotovení vzorků různými výrobními postupy zvolenou technologií ručního kladení vrstev s použitím vyhřívané desky.
- Vzorky byly po přípravě podrobeny navrženému testování.
- Byly doporučeny způsoby a opatření při dalším vyhotovení vzorků.

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání E - modulů v tahu vybraných kovů a vláken [17]	18
Tabulka 2 - Vlastnosti v odlišném směru vybraných vláken [17].....	18
Tabulka 3 - Vlastnosti jednotlivých typů neupravených skleněných vláken [2]	22
Tabulka 4 - Vlastnosti uhlíkových vláken [2].....	23
Tabulka 5 - Vlastnosti různých druhů aramidových vláken [2]	24
Tabulka 6 - Mechanické a fyzikální vlastnosti kevlaru v porovnání s twaronem a nylonem [9]	25
Tabulka 7 - Vlastnosti přírodních vláken [2]	26
Tabulka 8 - Přibližné složení čedičového vlákna [26]	28
Tabulka 9 - Vlastnosti čedičových vláken v porovnání se skleněnými [25]	28
Tabulka 10 - Typické vlastnosti kompozitu s uhlíkovou výztuží s termoplastickou nebo reaktoplastickou matricí (v e směru vláken) [17]	32
Tabulka 11 - Vlastnosti vybraných termoplastů používaných pro matrice kompozitů [35]	35
Tabulka 12 - Přehled dalších termoplastů používaných pro matrice kompozitů a jejich značení [35].....	35
Tabulka 13 - Další vlastnosti vybraných termoplastů používaných pro matrice kompozitů [35]	36
Tabulka 14 - Příklady navlhavých (polárních) a nenavlhavých (nepolárních) polymerů a hodnoty jejich nasákavosti za uvedených podmínek [35].....	37
Tabulka 15 - Rozměry zkušebního tělesa dle normy ČSN EN ISO 14125 [45]	54
Tabulka 16 - Teploty při výrobě vzorků č. 1 až 5	64
Tabulka 17 - Maximální naměřené hodnoty sil u T - zkoušky.....	65
Tabulka 18 - Maximální naměřené hodnoty sil u T - zkoušky pro porovnání různých druhů tkanin	68
Tabulka 19 - Podíl výztuže v laminátu a hustota jednotlivých typů tkanin	69
Tabulka 20 - Rozměry zkušebních těles (čedičová tkanina plátňové vazby).....	70
Tabulka 21 - Rozměry zkušebních těles (čedičová tkanina keprové vazby).....	70
Tabulka 22 - Rozměry zkušebních těles (kevlarová tkanina plátňové vazby)	70
Tabulka 23 - Hodnoty modulů pružnosti v ohybu vzorků s čedičovou tkaninou plátňové vazby	71

Tabulka 24 - Hodnoty modulů pružnosti v ohybu vzorků s čedičovou tkaninou keprové vazby	72
Tabulka 25 - Hodnoty modulů pružnosti v ohybu vzorků s kevlarovou tkaninou plátnové vazby	73
Tabulka 26 - Porovnání průměrných hodnot modulů pružnosti v ohybu pro vzorky s odlišnými tkaninami.....	74
Tabulka 27 - Naměřené hodnoty hmotnosti nasáklých vzorků ve zvolených časech.....	77
Tabulka 28 - Rozměry vzorků.....	78
Tabulka 29 - Hodnoty modulů pružnosti v ohybu navlhých vzorků	79
Tabulka 30 - Porovnání – dosažené hodnoty nenavlhých a navlhých vzorků	79
Tabulka 31 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků A (čedičová tkanina plátnové vazby)	83
Tabulka 32 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků B (čedičová tkanina plátnové vazby)	83
Tabulka 33 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků A (čedičová tkanina keprové vazby)	83
Tabulka 34 - Tabulka 25 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků B (čedičová tkanina keprové vazby).....	84
Tabulka 35 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků A (čedičová tkanina plátnové vazby)	86
Tabulka 36 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků B (čedičová tkanina plátnové vazby)	87
Tabulka 37 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků A (čedičová tkanina keprové vazby)	87
Tabulka 38 - Způsob kladení vrstev a naměřené teploty vzorků B (čedičová tkanina keprové vazby)	87
Tabulka 39 – Teploty vyhřívané desky a laminátu u způsobu č. 3	88
Tabulka 40 - Teploty vyhřívané desky a laminátu u způsobu č. 4.....	89
Tabulka 41 - Parametry broušení vzorků pro pozorování na mikroskopu	90

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Prepreg s uhlíkovými vlákny a příklad použití - interiérový díl automobilu [3], [4].....	4
Obrázek 2 - Synergický efekt kompozitů [5].....	5
Obrázek 3 - Použití kompozitních materiálů u Boeingu 787 Dreamliner [49].....	7
Obrázek 4 - Rám kola (vlevo) a helma (vpravo) z uhlíkového prepregu [7] [8].....	7
Obrázek 5 - Rozdělení kompozitů dle tvaru a orientace vláken [5].....	10
Obrázek 6 - Kompozity s odlišnými typy výztuže: a) jednosměrně vyztužený dlouhovláknový kompozit, b) dvousměrně vyztužený dlouhovláknový kompozit (tkanina), c) částicový kompozit, d) vrstvený kompozit, e) krátkovláknou kompozit s nahodilou orientací vláken [10].....	10
Obrázek 7 - Laminát - princip výroby a jeho druhy [11].....	11
Obrázek 8 - Tahový diagram [12].....	12
Obrázek 9 - Druhy vazeb; zleva: plátňová, saténová (atlasová) a keprová vazba [13]	13
Obrázek 10 - Uhlíková tkanina - keprová vazba (vlevo), plátňová vazba (vpravo) [14] ..	13
Obrázek 11 - Schéma tkaniny; (1) - osnova, (2) - útek [15].....	14
Obrázek 12 - Hybridní tkanina z uhlíkových a keplarových vláken (keprová vazba) [14]	14
Obrázek 13 - Dodávané formy vláken [16].....	16
Obrázek 14 - Prošívání multiaxiálních tkanin [13].....	17
Obrázek 15 - Tkanina - vyztužení ve dvou směrech (vlevo) a jednosměrná výztuže (vpravo) [13].....	17
Obrázek 16 - Tkaniny z různých materiálů - zleva nahoře: skleněná tkanina (plátňová vazba) [18], uhlíková tkanina (keprová vazba) [14], aramidová tkanina (keprová vazba) [19], keplarová tkanina (keprová vazba) [20], tkanina z juty (plátňová vazba) [21], čedičová tkanina (plátňová vazba)	19
Obrázek 17 - Porovnání hodnot hustoty, ceny, pevnosti v tahu a E - modulu vláken z různých materiálů [13].....	20
Obrázek 18 - Struktura para - amidu [22].....	25
Obrázek 19 - Základní rozdělení polymerů [27]	29
Obrázek 20 - Obecné rozdělení syntetických polymerů [28]	30
Obrázek 21 - Kovalentní vazba (vlevo) a Van der Waalsova vazba (vpravo) [29].....	31
Obrázek 22 - Polyethylen [31].....	33

Obrázek 23 - Polypropylen [32].....	33
Obrázek 24 - Polyethylentereftalát [33]	34
Obrázek 25 - Polyamid 66 a Polyamid 6 [34]	34
Obrázek 26 - Výroba jednosměrně vyztuženého prepregu (vlevo) a dvousměrně vyztuženého tkaninou (vpravo) [13].....	38
Obrázek 27 - Impregnace pomocí rozpouštědla (Solvent Impregnation) [13]	41
Obrázek 28 - LI 300 vertikální impregnovací linka firmy Mikrosam [37]	42
Obrázek 29 - Tavení za tepla - krok 1 [13].....	43
Obrázek 30 - Tavení za tepla - krok 2 [13].....	44
Obrázek 31 - Linka PLS-250-2F firmy Mikrosam [37]	45
Obrázek 32 - Commingling skleněných a polymerních vláken [39]	46
Obrázek 33 - Coweaving skleněných a polymerních vláken [39]	46
Obrázek 34 - Prášková metoda (powder scattering) [42]	47
Obrázek 35 - Stroj pro práškovou metodu (powder scattering) [41]	48
Obrázek 36 - Linka pro práškovou metodu [40]	49
Obrázek 37 - SMC (Sheet Moulding Compound) [43].....	50
Obrázek 38 - Zkouška tříbodovým ohybem [2]	53
Obrázek 39 - Průběh zatížení vzorku při tříbodovém ohybu [2]	53
Obrázek 40 - Doporučený tvar a rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku tahem dle ČSN EN ISO 527 [2].....	56
Obrázek 41 - Diagram závislosti síly na poměrném prodloužení laminátu s výztuží jednosměrně orientovaných vláken a z tkaniny; a) zatížení ve směru vláken, b) kolmo na směr vláken; c) zlom u zatížení laminátu vyztuženého ve dvou kolmých směrech [2]	57
Obrázek 42 - DSC pro použité PE prášky.....	61
Obrázek 43 - Schéma vrstvení vzorku pro T - zkoušku.....	62
Obrázek 44 - Rozměry vzorků pro T - zkoušku.....	63
Obrázek 45 - Vzorek č. 1 (vlevo) a vzorek č. 5 (vpravo) po provedené T - zkoušce	65
Obrázek 46 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE (DOWLEX)	66
Obrázek 47 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE (DOWLEX)	66
Obrázek 48 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE (DOWLEX)	67
Obrázek 49 - Graf závislosti síly a deformace T - zkoušky	68
Obrázek 50 - Rozměry vzorku pro zkoušku tříbodovým ohybem.....	69
Obrázek 51 - Schéma výroby laminátu pro zkoušku tříbodovým ohybem.....	69

Obrázek 52 - Graf naměřených hodnot síly a průhybu vzorků s čedičovou tkaninou plátnové vazby	71
Obrázek 53 - Graf naměřených hodnot síly a průhybu vzorků s čedičovou tkaninou keprové vazby	72
Obrázek 54 - Graf naměřených hodnot síly a průhybu vzorků s kevlarovou tkaninou plátnové vazby	73
Obrázek 55 - Grafy naměřených hodnot - E modul v ohybu vzorků s čedičovými a skleněnými rovingy [46]	75
Obrázek 56 - Naměřené hodnoty při zkoušce tříbodovým ohybem epoxidu s kevlarovou tkaninou [47]	76
Obrázek 57 - Naměřené hodnoty při zkoušce tříbodovým ohybem PP se skelnou tkaninou [48]	76
Obrázek 58 - Graf naměřených hodnot síly a průhybu nasáklých vzorků	78
Obrázek 59 - Schéma výroby a skladby laminátu A	80
Obrázek 60 - Způsob č. 1 - krok 1 - laminát A	81
Obrázek 61 - Způsob č. 1 - krok 2 - laminát B	81
Obrázek 62 - Způsob č. 1 - krok 3 - laminát C	82
Obrázek 63 - Způsob č. 1 - krok 4 - laminát D	82
Obrázek 64 - Způsob č. 2 - krok 1 - laminát A	84
Obrázek 65 - Způsob č. 2 - krok 2 - laminát B	85
Obrázek 66 - Způsob č. 2 - krok 3 - laminát B	85
Obrázek 67 - Způsob č. 2 - krok 4 - laminát D	86
Obrázek 68 - Způsob č. 3	88
Obrázek 69 - Způsob č. 4 - krok 1 a krok 2	89
Obrázek 70 - Způsob č. 1 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE	91
Obrázek 71 - Způsob č. 1 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE	91
Obrázek 72 - Způsob č. 2 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE	92
Obrázek 73 - Způsob č. 2 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE	92
Obrázek 74 - Způsob č. 2 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE	93
Obrázek 75 - Způsob č. 2 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE	93
Obrázek 76 Způsob č. 3 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE	94
Obrázek 77 - Způsob č. 3 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE	94
Obrázek 78 - Způsob č. 3 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE	95
Obrázek 79 - Způsob č. 3 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE	95

Obrázek 80 - Způsob č. 4 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE.....	96
Obrázek 81 - Způsob č. 4 - Čedičová tkanina plátnové vazby a PE.....	96
Obrázek 82 - Způsob č. 4 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE.....	97
Obrázek 83 - Způsob č. 4 - Čedičová tkanina keprové vazby a PE.....	97
Obrázek 84 - Kevlarová tkanina plátnové vazby a PE.....	98
Obrázek 85 – Ohybem deformovaný vzorek z čedičové tkaniny plátnové vazby a PE.....	98
Obrázek 86 – Ohybem deformovaný vzorek z čedičové tkaniny plátnové vazby a PE.....	99

Citace

- [1] **VÝZKUM MATRIC PRO PREPREG APLIKACE** [online]. Zlín, 2017 [cit. 2018-10-02]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40666/sigmund_2017_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. **Polymerní kompozitní materiály**. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN isbn978-80-86960-29-6.
- [3] **Carbon Fiber Prepreg** [online]. IndiaMART: IndiaMART, 2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/carbon-fiber-fabric-for-structural-strengthening-15653338430.htm>
- [4] **Prepreg technologie** [online]. form: FORM, 2018 [cit. 2018-10-02]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/prepreg>
- [5] **PŘÍPRAVA A APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ NA SOUČÁSTI AUTOBUSŮ** [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=82031. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [6] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. **Perspektivní materiály**. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [7] **Štěrbka kola** [online]. Praha: Štěrbka kola, 2016 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <https://www.sterba-kola.cz/archive/clanky/datum/2005-1-5>
- [8] **High Quality Prepreg Carbon Fiber helmet cover (Autoclave process)** [online]. Čína: Aurora, 2018 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <https://www.helmetsupplier.com/cz/products/High-Quality-Prepreg-Carbon-Fiber-helmet-cover-Autoclave-process.html#.W7pQgegzaUk>
- [9] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. **Nauka o materiálu**. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [10] **Elektrické vlastnosti kompozitních materiálů s plnivý na bázi vodivých polymerů** [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14994410-Zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta->

elektrotechnicka-katedra-technologie-a-mereni-diplomova-prace.html. Diplomová práce.
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.

[11] **Kompozitové materiály v leteckém průmyslu v ČR** [online]. Praha: Ústav Automobilů, kolejivých vozidel a letadlové techniky, 2006 [cit. 2018-10-02]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/clanky/compdb/kompozitove_mat_v_let_prumyslu_CR.pdf

[12] **Vliv orientace a skladby materiálů na výsledné vlastnosti kompozitního systému** [online]. Zlín, 2017 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40808/musil_2017_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati.

[13] **Prepreg Technology** [online]. HEXCEL: HexPly®, 2018 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/design-materials-fabrication/composite-materials-dam/Education/Manufacturing_of_Polymer_Composites/FS2017/Prepreg_Technology.pdf

[14] **O VÝROBĚ** [online]. Praha: © Carbon Parts, 2018 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <http://www.carbon-parts.cz/technology.html>

[15] **Tkanina** [online]. Wikipedie: Wikipedie, 2018 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tkanina>

[16] **Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů** [online]. Havel Composites: HAVEL Composites, 2018 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>

[17] BUNSELL, A. R a J. RENARD. **Fundamentals of fibre reinforced composite materials**. Bristol: Institute of Physics Publishing, c2005. ISBN 0750306890.

[18] **SKELNÁ TKANINA 300G/M2** [online]. Praha: Boatpark, 2018 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <https://www.boatpark.cz/skelna-tkanina-300gm2.html>

[19] **Kevlarová tkanina (kepr)** [online]. Jihlava: Valdemar Kostka, 2018 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <https://www.kostkamodelcentrum.cz/obchod.aspx?polozka=6457>

[20] **Aramidová tkanina - kepr** [online]. Havel Composites: Havel Composites, 2018 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/shop/41-Klasicke/461->

Aramidova-tkanina-110gmspan-stylefont-size-11pxsup2supspan---cs-interglas-98608-kepr-22.html?calcqty=50

[21] **Juta přírodní** [online]. fler: Fler, 2018 [cit. 2018-10-17]. Dostupné z: <https://www.fler.cz/zbozi/juta-prirodni-sire-105-cm-zbytek-8421949>

[22] **Kevlar** [online]. Wikipedie: Wikipedie, 2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kevlar>

[23] **Kevlar** [online]. Top-ArmyShop: Top-ArmyShop.cz, 2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://www.top-armyshop.cz/slovník-pojmu/kevlar>

[24] **VYUŽITÍ KEVLAROVÝCH VLÁKEN V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH** [online]. BRNO, 2016 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=121532. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT v Brně.

[25] **Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků** [online]. basaltex: Basaltex, 2018 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: http://basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm

[26] **A Short Review on Basalt Fiber: Kunal Singha** [online]. India: Department of Textile Engineering, Panipat Institute of Engineering & Technology, Harayana, 2012 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://article.sapub.org/pdf/10.5923.j.textile.20120104.02.pdf>

[27] **Polymery** [online]. publi.cz: Podpora přírodovědného a technického vzdělávání v Pardubickém kraj, 2016 [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>

[28] **Základní rozdělení plastů** [online]. Polymery: Plasty, 2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <http://files.pazderalev.webnode.cz/200000159-94bfa96b3d/Z%C3%A1kladn%C3%AD%20d%C4%9Blen%C3%AD%20plast%C5%AF.jpg>

[29] **VĚDA A TECHNIKA V POZADÍ** [online]. Science Center: © Techmania Science Center, 2018 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/983>

[30] **Polymery** [online]. publi.cz: Podpora přírodovědného a technického vzdělávání v Pardubickém kraj, 2016 [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>

[31] **Polyethylen** [online]. Dansk: PlastIndustrien, 2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://plast.dk/det-store-plastleksikon/polyethylen/>

[32] **Polypropylen** [online]. Wikipedie: Wikipedie, 2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>

[33] **Polyethylentereftalát** [online]. wikiwand: Wikiwand, 2018 [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/cs/Polyethylentereftal%C3%A1t>

[34] **Understanding the crystallization behavior of polyamide 6/polyamide 66 alloys from the perspective of hydrogen bonds: projection moving-window 2D correlation FTIR spectroscopy and the enthalpy** [online]. © Royal Society of Chemistry: Royal Society of Chemistry, 2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ra/c6ra09611e/unauth#!divAbstract>

[35] PTÁČEK, Luděk. **Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd.** Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.

[36] LENGSELD, Hauke. **Composite technology: prepregs and monolithic part fabrication technologies.** Cincinnati: Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-599-9.

[37] **PRODUCTS** [online]. Mikrosam: Mikrosam, 2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://mikrosam.com/new/article/en/how-we-work/>

[38] **Composite Prepregs – Manufacturing, Benefits and Applications** [online]. AZoNetwork: AZO Materials, 2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8353>

[39] **Forming and Consolidation of Textile Composites** [online]. UNIVERSITY OF NOTTINGHAM SCHOOL OF MECHANICAL, MATERIALS, MANUFACTURING ENGINEERING AND MANAGEMENT, 2003 [cit. 2018-10-04]. Dostupné z: <http://eprints.nottingham.ac.uk/11895/1/275288.pdf>. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. University of Nottingham.

[40] **Powder Scattering System "PowderScatt"** [online]. Diesel-Straße 32: Schott & Meissner Maschinen- und Anlagenbau GmbH Rudolf, 2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z:

<https://www.schott-meissner.de/en/products/coating-systems/dry-coating-systems/detail/powder-scattering-system-powderscatt/>

[41] **Powerline Powder Applicators** [online]. Reliant: Reliant Machinery, 2015 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <http://reliant-machinery.com/shop/powder-applicators/powerline-powder-coaters/>

[42] **Scattering** [online]. Maschinenfabrik Herbert Meyer GmbH: Herbert-Meyer-Str. 1 92444 Roetz Německo, 2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.meyer-machines.com/en/scattering/technology/>

[43] **TECHNOLOGIE VÝROBY: SMC** [online]. PREFA KOMPOZITY, a.s.: Brno, 2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/smc/>

[44] **T – zkouška v odlupování lepených sestav z ohebných adherendů**. Norma ČSN EN ISO 11 339. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: Praha, 2010.

[45] **Vlákny vyztužené plastové kompozity – Stanovení ohybových vlastností**. Norma ČSN EN ISO 14 125. Český normalizační institut: Praha, 1999.

[46] **POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S VÝZTUŽÍ ZE SKLENĚNÝCH A ČEDIČOVÝCH VLÁKEN** [online]. Liberec, 2015 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/24463/BP_Martina_Tognerova.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. TUL.

[47] **Vlastnosti polymerních dlouhovláknových kompozitů s různými výztužemi** [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf12/2540.pdf>. STČ. ČVUT.

[48] **Kompozitní materiály na bázi polypropylenové matrice** [online]. Zlín, 2012 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/23106/go%C5%88a_2012_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati.

[49] **Boeing 787 Dreamliner Specs** [online]. Modern Airlines: Modern Airlines, 2018 [cit. 2018-10-02]. Dostupné z: <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>

III - PŘÍLOHY

Seznam příloh

Příloha 1 - Naměřené hodnoty síly a průhybu vzorků s čedičovou tkaninou plátnové vazby

Příloha 2 - Naměřené hodnoty síly a průhybu vzorků s čedičovou tkaninou plátnové vazby

Příloha 3 - Naměřené hodnoty síly a průhybu vzorků s Kevlarovou tkaninou plátnové vazby

Příloha 4 - Naměřené hodnoty síly a průhybu nasáklých vzorků

Příloha 1

Naměřené hodnoty síly a průhybu vzorků s čedičovou tkaninou plátňové vazby

vzorek č. 1		vzorek č. 2		vzorek č. 3		vzorek č. 4		vzorek č. 5	
F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]
4	0,49	4	0,81	6	0,8	6	0,32	4	0,1
6	0,64	6	1,07	8	0,91	8	0,4	6	0,21
8	0,79	8	1,29	10	0,98	10	0,46	8	0,33
10	0,88	10	1,43	12	1,05	12	0,51	10	0,41
12	0,95	12	1,55	14	1,14	14	0,57	12	0,49
14	1,02	14	1,66	16	1,25	16	0,64	14	0,56
16	1,12	16	1,81	18	1,33	18	0,69	16	0,62
18	1,22	18	1,96	20	1,41	20	0,76	18	0,74
20	1,29	20	2,15	22	1,5	22	0,82	20	0,82
22	1,37	22	2,37	24	1,62	24	0,9	22	0,9
24	1,48	24	2,7	26	1,75	26	0,97	24	1
26	1,58	26	3,24	28	1,98	28	1,06	26	1,13
28	1,69	-	-	-	-	30	1,13	28	1,26
30	1,84	-	-	-	-	32	1,22	30	1,42
-	-	-	-	-	-	34	1,34	32	1,67

Příloha 2

Naměřené hodnoty síly a průhybu vzorků s čedičovou tkaninou plátňové vazby

vzorek č. 1		vzorek č. 2		vzorek č. 3		vzorek č. 4		vzorek č. 5	
F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]
4	0,49	4	0,81	6	0,8	6	0,32	4	0,1
6	0,64	6	1,07	8	0,91	8	0,4	6	0,21
8	0,79	8	1,29	10	0,98	10	0,46	8	0,33
10	0,88	10	1,43	12	1,05	12	0,51	10	0,41
12	0,95	12	1,55	14	1,14	14	0,57	12	0,49
14	1,02	14	1,66	16	1,25	16	0,64	14	0,56
16	1,12	16	1,81	18	1,33	18	0,69	16	0,62
18	1,22	18	1,96	20	1,41	20	0,76	18	0,74
20	1,29	20	2,15	22	1,5	22	0,82	20	0,82
22	1,37	22	2,37	24	1,62	24	0,9	22	0,9
24	1,48	24	2,7	26	1,75	26	0,97	24	1
26	1,58	26	3,24	28	1,98	28	1,06	26	1,13
28	1,69	-	-	-	-	30	1,13	28	1,26
30	1,84	-	-	-	-	32	1,22	30	1,42
-	-	-	-	-	-	34	1,34	32	1,67

Příloha 3

Naměřené hodnoty síly a průhybu vzorků s Kevlarovou tkaninou plátňové vazby

vzorek č. 1		vzorek č. 2		vzorek č. 3		vzorek č. 4		vzorek č. 5	
F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]
4	0,9	4	0,52	4	0,42	4	0,81	4	0,95
6	1,24	6	1,02	6	0,61	6	1,11	6	1,2
8	1,43	8	1,45	8	1,03	8	1,33	8	1,51
10	1,65	10	1,95	10	1,28	10	1,5	10	1,82
12	1,88	12	2,25	12	1,47	12	1,65	12	2,01
14	2,03	14	2,6	14	1,71	14	1,88	14	2,2
16	2,2	16	3,02	16	1,97	16	2,1	16	2,69
18	2,46	18	3,31	18	2,16	18	2,32	18	3
20	2,65	20	3,75	20	2,35	20	2,51	20	3,34
22	2,84	-	-	22	2,49	22	2,82	22	3,75
24	3,11	-	-	24	2,7	24	3,19	24	4,2
26	3,35	-	-	26	2,92	26	3,54	26	4,76
28	3,55	-	-	28	3,1	28	3,89	-	-
30	3,84	-	-	30	3,34	30	4,35	-	-
-	-	-	-	32	3,61	-	-	-	-

Příloha 4

Naměřené hodnoty síly a průhybu nasáklých vzorků

vzorek s čedičovou tkaninou plátnové vazby		vzorek s čedičovou tkaninou keprové vazby		vzorek s Kevlarovou tkaninou plátnové vazby	
F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]	F [N]	y [mm]
4	0,7	4	0,89	6	0,5
6	1,5	6	1	8	0,74
8	2,27	8	1,19	10	0,97
10	2,6	10	1,33	12	1,26
12	2,92	12	1,42	14	1,49
14	3,44	14	1,5	16	1,75
-	-	16	1,66	18	1,98
-	-	18	1,81	20	2,26
-	-	20	1,92	22	2,57
-	-	22	2,12	24	2,89
-	-	24	2,37	26	3,33
-	-	26	2,72	-	-