

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Bc. Nikola Soukupová

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek
Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

Studium vlivu různých kompozitních systémů vyrobených ruční laminací na
mechanické vlastnosti

Bc. Nikola Soukupová

Diplomová práce

2019

The University Pardubice
Faculty of chemical technology
Institute of chemistry and technology of macromolecular substances
Department of synthetic polymers, fibers and textile chemistry

Study of the influence of various composite systems made by hand lay-up
lamination on mechanical properties

Bc. Nikola Soukupová

Master thesis

2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Nikola Soukupová**
Osobní číslo: **C17540**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Technologie výroby a zpracování polymerů**
Název tématu: **Studium vlivu různých kompozitních systémů vyrobených
ruční laminací na mechanické vlastnosti**
Zadávající katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. V literární rešerši přehledně popište kompozitní materiály, různé typy matic a výztuží s důrazem na epoxidové systémy, jejich modifikace, vytvrzování a sklovláknitou výztuž.
2. V teoretické části se dále zaměřte na stručný přehled problematiky přípravy a zpracování kompozitních materiálů se zaměřením na ruční laminaci s přihlédnutím na využití při stavbě leteckých modelů.
3. Připravte jednotlivé vzorky různých typů matic z rozdílných epoxidových systémů a proměřte jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti. Na základě výsledků vyberte vhodné systémy pro stavbu leteckých modelů a připravte kompozitní materiály na bázi epoxidové pryskyřice s rozdílnými typy sklovláknitých výztuží.
4. Studujte vliv jednotlivých typů výztuží a epoxidových systémů v připravených kompozitních materiálech na mechanické vlastnosti ve srovnání se standardním systémem často používaným pro danou aplikaci.
5. Srovnajte a diskutujte zjištěné výsledky mechanických vlastností v závislosti na typu matrice a výztuže a porovnejte dané vlastnosti se standardním vzorkem.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Prokůpek, Dr.**
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Datum zadání diplomové práce: **21. prosince 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2019**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2019

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 9. 5. 2019

Bc. Nikola Soukupová

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat panu Ing. Luboši Prokúpkovi, Dr. za vedení mé diplomové práce, odborný dohled a cenné rady. Děkuji také firmě SYNPO, a.s. za nařezání vzorků a měření gelové permeační chromatografie. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Janu Honzíčkovi Ph.D. za naměření infračervené spektroskopie.

ANOTACE

Tato diplomová práce je věnována vybraným kompozitním skelným materiálům se zaměřením na letecký průmysl, a to především výrobu RC modelů letadel. V literární rešerši jsou představeny vybrané materiály, jejich výroba a následně zpracování různými způsoby laminování. Experimentální část se zabývá testováním epoxidových systémů, přípravou vybraných kompozitních vzorků a jejich studiem z hlediska fyzikálně-mechanických vlastností pro jednotlivé typy výztuží.

KLÍČOVÁ SLOVA

kompozity, letecké modelářství, skelné tkaniny, epoxidové pryskyřice, fyzikálně-mechanické vlastnosti, ruční laminace

TITLE

Study of the influence of various composite systems made by hand lay-up lamination on mechanical properties

ANNOTATION

This master thesis is focused on aerospace industry, especially on production of RC aircraft models. In the literature search, selected materials, their production and data processing by laminating methods are presented. The experimental part deals with testing of epoxy systems, preparation of selected composite samples and their study in terms of physical-mechanical properties for individual types of reinforcement.

KEY WORDS

composites, aeromodelling, glass fabrics, epoxide resins, tensile properties

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	11
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM GRAFŮ	14
SEZNAM ZKRATEK	15
1 ÚVOD.....	16
2 TEORETICKÁ ČÁST	18
2.1 Definice kompozitních materiálů.....	18
2.2 Materiály využívané pro kompozity	20
2.2.1 Gelcoat.....	20
2.2.2 Termoplastické matrice.....	21
2.2.3 Nenasycené polyesterové pryskyřice.....	21
2.2.4 Epoxidové pryskyřice	22
2.2.5 Modifikace epoxidových pryskyřic	24
2.3 Separátory forem.....	26
2.3.1 Vosky.....	27
2.3.2 PVA – ECO	27
2.4 Vlákná	27
2.4.1 Uspořádání vláken – suchá forma.....	27
2.5 Druhy vláken.....	33
2.5.1 Aramidová vlákna.....	33
2.5.2 Borová vlákna	34
2.5.3 Uhlíková vlákna.....	35
2.5.4 Grafitová vlákna	39
2.5.5 Skleněná vlákna	39
2.6 Apretace vláken.....	42
2.7 Zvlákňování.....	43
2.8 Technologie laminování.....	43
2.8.1 Autokláv.....	43
2.8.2 Vakuování.....	44
2.8.3 Lisování	45
2.8.4 Stříkání.....	46
2.8.5 Pultruze	46
2.8.6 Kontaktní ruční laminování	47
2.9 Příklady aplikace v leteckém průmyslu a modelářství.....	48

3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	50
3.1	Použité materiály.....	50
3.2	Výroba vzorků.....	55
3.2.1	Příprava epoxidových desek - matrice.....	55
3.2.2	Příprava desek ze skelných výztuží	55
3.3	Metodika měření	58
3.3.1	Stanovení aminového čísla	58
3.3.2	Stanovení obsahu epoxidových skupin dle Jaye.....	59
3.3.3	Viskozita dle Höpplera	59
3.3.4	Infračervená spektroskopie	59
3.3.5	Vytvrzovací charakteristika	60
3.3.6	Doba želatinace.....	60
3.3.7	Extrahovatelný podíl.....	60
3.3.8	Stanovení obsahu popela	61
3.3.9	Termomechanická analýza (TMA).....	61
3.3.10	Trhací stroj MTS-4/M.....	61
3.3.11	Měření rázové houževnatosti pomocí Charpyho kladiva	63
3.3.12	Tvrдость dle Vickerse	64
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	65
4.1	Charakterizace epoxidových pryskyřic a tvrdidel.....	65
4.1.1	Infračervená spektroskopie	66
4.2	Vlastnosti epoxidových systémů.....	71
4.3	Vlastnosti vytvrzených epoxidových systémů	74
4.3.1	Extrahovatelný podíl.....	74
4.3.2	TMA.....	74
4.3.3	Pevnost v tahu epoxidových matric	75
4.3.4	Pevnost v ohybu epoxidových matric	77
4.3.5	Rázová houževnatost matric	79
4.3.6	Tvrдость dle Vickerse	80
4.4	Vlastnosti laminátových systémů.....	80
4.4.1	Obsah nespalitelného podílu	81
4.4.2	Pevnost v tahu skelných laminátů.....	83
4.4.3	Pevnost v ohybu skelných laminátů.....	88
4.4.4	Rázová houževnatost skelných laminátů	91
4.4.5	Tvrдость dle Vickerse	93

5	ZÁVĚR	95
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	96

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Synergické chování matrice a výztuže [1]	19
Obrázek 2 Kompozitní materiály s různým tvarem geometrické výztuže [1]	19
Obrázek 3 Oxiranová skupina [1]	22
Obrázek 4 Syntéza epichlorhydrinu s bisfenolem A [1]	23
Obrázek 5 Síťování epoxidové pryskyřice pomocí aminu [1]	24
Obrázek 6 Sklená příze [9]	28
Obrázek 7 Uhlíkový roving [1]	28
Obrázek 8 Netkaná textilie [10]	29
Obrázek 9 Druhy základních vazeb [1]	30
Obrázek 10 Hybridní tkanina – kevlar-uhlík [11]	30
Obrázek 11 Skelný úplet [12]	31
Obrázek 12 Uhlíková páska [1]	31
Obrázek 13 Ilustrace výroby prepregů [1]	32
Obrázek 14 Polymerní struktura aramidových vláken [1]	33
Obrázek 15 Kevlarová tkanina [14]	34
Obrázek 16 Borová příze [15]	35
Obrázek 17 Závislost mechanické pevnosti na elastickém modulu pružnosti [16]	36
Obrázek 18 Mokré zvlákňování [1]	37
Obrázek 19 Zvlákňování z taveniny užívané pro výrobu mezofázových uhlíkových vláken [1]	38
Obrázek 20 Schéma procesu výroby skelných vláken [1]	40
Obrázek 21 Náhled apretační vrstvy na vlákně [19]	42
Obrázek 22 Autokláv [1]	44
Obrázek 23 Vakuová infuze [20]	45
Obrázek 24 Lisování	45
Obrázek 25 Stříkání [22]	46
Obrázek 26 Pultruze [23]	47
Obrázek 27 Velurový váleček pro kontaktní laminování [24]	48
Obrázek 28 Ruční laminace [25]	48
Obrázek 29 Faeta 321 NG [28]	49
Obrázek 30 RC model letadla Yak 54 [29]	49
Obrázek 31 Stříhání tkaniny	56
Obrázek 32 Vytvrzená netkaná rohož	56

Obrázek 33 Zatížení vytvrzovaných desek.....	56
Obrázek 34 Vzorek ve tvaru "psí kosti" pro měření pevnosti v tahu.....	58
Obrázek 35 Trhací stroj MTS - 4/M – čelisti na tah.....	62
Obrázek 36 Trhací stroj MTS - 4/M – ohyb.....	63
Obrázek 37 Charpyho kladivo.....	64
Obrázek 38 Tvrdoměr Nemesis 9000 – Innovatest.....	64
Obrázek 39 IČ spektrum epoxidové pryskyřice L285.....	67
Obrázek 40 IČ spektrum epoxidové pryskyřice CHS EPOXY 574.....	67
Obrázek 41 IČ spektrum epoxidové pryskyřice CHS EPOXY 582.....	68
Obrázek 42 IČ spektrum tvrdidla 285.....	68
Obrázek 43 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0482.....	69
Obrázek 44 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0492.....	69
Obrázek 45 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0502.....	70
Obrázek 46 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0512.....	70
Obrázek 47 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0590.....	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti vybraných aramidových vláken v závislosti na teplotě [1].....	34
Tabulka 2 Rozdělení uhlíkových vláken podle modulu pružnosti a pevnosti v tahu [16].....	36
Tabulka 3 Vybrané typy skel a jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti [13].....	41
Tabulka 4 Vlastnosti tvrdidel 285, 286, 287 [1].....	50
Tabulka 5 Míchací poměry pryskyřice a tvrdidel [1].....	51
Tabulka 6 Vlastnosti CH EXPOXY 574 [31].....	51
Tabulka 7 Vlastnosti CHS EPOXY 582 [32].....	52
Tabulka 8 Vlastnosti Telalitu 0482 [31].....	52
Tabulka 9 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [31], [32]	52
Tabulka 10 Vlastnosti Telalitu 0492 [31].....	52
Tabulka 11 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [31], [32]	53
Tabulka 12 Vlastnosti Telalitu 0502 [31].....	53
Tabulka 13 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [31], [32]	53
Tabulka 14 Vlastnosti Telalitu 0512 [31].....	53

Tabulka 15 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [31], [32]	54
Tabulka 16 Vlastnosti Telalitu 0512 [32]	54
Tabulka 17 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [32]	54
Tabulka 18 Poměr navážek epoxid:tvrdidlo pro skelnou výztuž s gramáží 220 g/m ²	57
Tabulka 19 Poměr navážek epoxid:tvrdidlo pro skelnou výztuž s gramáží 160 g/m ²	57
Tabulka 20 Poměr navážek epoxid:tvrdidlo pro skelnou netkanou výztuž s gramáží 450 g/m ²	57
Tabulka 21 Charakteristika epoxidových pryskyřic	65
Tabulka 22 Charakteristika použitých tvrdidel	66
Tabulka 23 Charakteristika matric dle doby vytvrzení	72
Tabulka 24 Extrahovatelný podíl epoxidových matric	74
Tabulka 25 Výsledky termomechanické analýzy epoxidových matric	75
Tabulka 26 Zkouška pevnosti v tahu epoxidových matric	76
Tabulka 27 Zkouška pevnosti v ohybu epoxidových matric	78
Tabulka 28 Rázová houževnatost epoxidových matric	79
Tabulka 29 Tvrdost epoxidových systémů dle Vickerse	80
Tabulka 30 Obsah nespalitelného podílu u skelné tkaniny s gramáží 220 g/m ²	82
Tabulka 31 Obsah nespalitelného podílu u skelné tkaniny s gramáží 160 g/m ²	82
Tabulka 32 Obsah nespalitelného podílu u skelné netkané rohože s gramáží 450 g/m ²	82
Tabulka 33 Výsledky měření meze pevnosti v tahu skelné tkaniny 220 g/m ²	83
Tabulka 34 Výsledky měření meze pevnosti v tahu skelné tkaniny 160 g/m ²	85
Tabulka 35 Výsledky měření meze pevnosti v tahu skelné netkané rohože 450 g/m ²	86
Tabulka 36 Výsledky měření meze pevnosti v ohybu skelné tkaniny 220 g/m ²	88
Tabulka 37 Výsledky měření meze pevnosti v ohybu skelné tkaniny 160 g/m ²	89
Tabulka 38 Výsledky měření meze pevnosti v ohybu skelné netkané rohože 450 g/m ²	90
Tabulka 39 Rázová houževnatost skelné tkaniny 220 g/m ²	92
Tabulka 40 Rázová houževnatost skelné tkaniny 160 g/m ²	92
Tabulka 41 Rázová houževnatost skelné netkané rohože 450 g/m ²	92
Tabulka 42 Tvrdost dle Vickerse pro skelnou tkaninu 220 g/m ²	93
Tabulka 43 Tvrdost dle Vickerse pro skelnou tkaninu 160 g/m ²	93
Tabulka 44 Tvrdost dle Vickerse pro skelnou netkanou rohož 450 g/m ²	94

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Kalibrační křivka pro vytvrzovací charakteristiku	73
Graf 2 Vytvrzovací charakteristika jednotlivých epoxidových systémů	73
Graf 3 Porovnání mezi pevnosti v tahu epoxidových matric.....	76
Graf 4 Porovnání tažnosti jednotlivých epoxidových systémů	77
Graf 5 Porovnání mezi pevnosti v ohybu epoxidových matric	78
Graf 6 Porovnání mezi pevnosti v tahu pro skelnou tkaninu 220 g/m ²	84
Graf 7 Porovnání tažnosti pro skelnou tkaninu 220 g/m ²	84
Graf 8 Porovnání mezi pevnosti v tahu pro skelnou tkaninu 160 g/m ²	85
Graf 9 Porovnání mezi pevnosti v tahu pro skelnou tkaninu 160 g/m ²	86
Graf 10 Porovnání mezi pevnosti v tahu skelné netkané rohože 450 g/m ²	87
Graf 11 Porovnání tažnosti skelné netkané rohože 450 g/m ²	87
Graf 12 Porovnání mezi pevnosti v ohybu pro skelnou tkaninu 220 g/m ²	89
Graf 13 Porovnání mezi pevnosti v ohybu pro skelnou tkaninu 160 g/m ²	90
Graf 14 Porovnání mezi pevnosti v ohybu skelné netkané rohože 450 g/m ²	91

SEZNAM ZKRATEK

- BADGE – diandiglycidylether bisfenolu A
- CAPS – Cirrus Airframe Parachute System – společnost vyrábějící letadla
- DETA – diethylentriamin
- HM – vysoce elastický typ modulu
- HT – standardní elastický modul
- IČ – infračervená spektroskopie
- IM – středně elastický modul
- IPDA – isophorondiamin
- IUPAC – Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou chemii
- LM – nízko elastický modul
- PA 66 – nylon
- PAN – polyakrylonitril
- PEEK – polyetheretherketon
- PEI – polyethylenimin
- PP – polypropylen
- PPD-T – poly(p-fenylentereftalamid)
- PPS – polyfenylensulfid
- PVA – polyvinylalkohol
- RIM – reakční injekční vstřikování
- SCRIM – Seemansovo kompozitní reakční injekční vstřikování
- TETA – triethylentetraamin
- TMA – termomechanická analýza
- UD – jednosměrná vazba vláken
- UHM – ultra vysoce elastický modul
- VOC – nízkotěkavé organické látky

1 ÚVOD

Kompozitní materiály se v letecko-modelářském světě objevují již delší dobu, avšak až v 90. letech 20. století v České republice začaly vznikat první modelářské firmy vyrábějící kompozitová letadla, které se postupem času staly známé po celém světě, do té doby se používal kompozit spíše jen na části RC modelů letadel (kryt motoru) a na jejich zpravování po nehodě samotnými RC piloty. Především v minulém století bylo totiž běžné, že si modeláři spoustu modelů vyráběli sami (tzv. od špejle) a nebylo tomu jako dnes, kdy se dá vše koupit ve stavebnicích, a tak už není tolik potřeba zručnosti ke stavbě modelu. Opravdový „boom“ však tyto firmy postupně zažívají až ve 21. století, což je způsobeno i ekonomickým růstem v Evropě, ale i po celém světě. Proto v posledních letech začaly vznikat i menší firmy na výrobu kompozitových RC modelů letadel. Je však otázkou, jak dlouho se tyto firmy dokáží udržet na trhu, protože ekonomika začíná stagnovat a první, co si běžný občan přestane kupovat není jídlo, které ho živí, ale právě tyto hobby věci, které nepatří mezi nejlevnější záležitost, obzvlášť v případě kompozitových strojů.

Pro kompozitové RC modely neexistují žádné technické normy, které musí splňovat, jako je tomu u velkých letadel, například u ultralightů, které se podrobují náročným zatěžkávacím zkouškám pod dohledem Úřadu pro civilní letectví a dostávají tzv. typové osvědčení. Je to logické, vzhledem k tomu, že v ultralightu jde o život lidí, kdežto v případě RC modelu jde „pouze“ o letadlo jako takové a případnou pověst výrobce. Existují ovšem pravidla, pro jednotlivé kategorie, které k jednotlivým typům letadel a jejich velikosti určují i hmotnost, kterou musí splňovat plně vybavené letadlo i s palivem, respektive baterkami. Například model kategorie F3A o maximální velikosti 2x2 metry (rozpětí a délka trupu) musí splňovat hmotnost 5 kg, nebo model z kategorie F3M musí mít maximální hmotnost 25 kg (do nedávna to bylo ještě 20 kg) a tyto modely nemají pevně stanovené maximální rozměry, avšak aby byla splněna podmínka váhy, tak se jejich maximální délka rozpětí pohybuje do 3,1 m.

Avšak i výrobci RC modelů musí své výrobky testovat, aby zjistili, zda je jejich pevnost adekvátní, a tak má každá větší firma své tovární piloty, kteří zkouší nejen aerodynamiku, respektive jak dobře se s tím daným letadlem létá, ale i ho zatěžují v letu různými manévry. Převážná většina z nich tedy netestuje jednotlivé komponenty (epoxidové systémy, výztuže atd.), ale spoléhá se na výpočty, potažmo hlavně na své vlastní zkušenosti z předchozích let a na běžně používanou certifikovanou leteckou pryskyřici L285, která je ovšem drahá. Proto je tato diplomová práce věnována testování dvou vybraných pryskyřic s 4 – 5 tvrdidly v kombinaci se skelnými výztužemi, aby se zjistilo, zda nevykazuje některý ze systémů shodné,

či dokonce lepší vlastnosti, a tak by se dalo velmi ušetřit a zpřístupnit letadla s touto technologií širšímu spektru lidí.

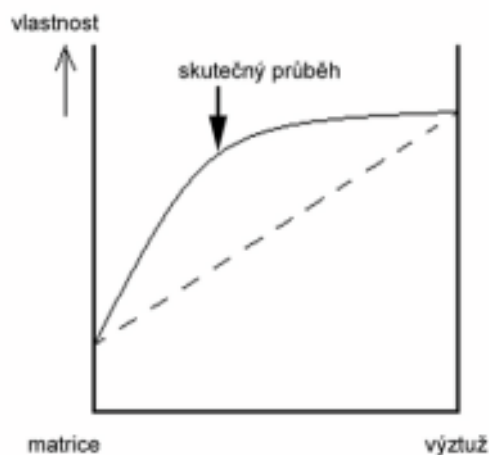
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Definice kompozitních materiálů

Kompozitní materiály vznikají spojením dvou či více různých fází, které se liší svými fyzikálními, mechanickými i chemickými vlastnostmi. Tyto fáze se na první pohled rozlišují podle toho, zda je fáze spojitá, v takovém případě se jedná o matici, nebo nespojitá, nazývána výztuž. Ta má v porovnání s maticí lepší mechanické vlastnosti a lze ji rozpoznat již na první pohled, neboť může mít podobu vláken, tkanin, částic, nebo vloček, zkrátka jde o pevné částice. Jsou to tzv. heterogenní materiály. V historii, při objevování a zkoumání kompozitních materiálů vznikaly jejich různé definice, ale ne vždy zcela přesně charakterizovali tento druh materiálu. Jednou z těch dokonalejších je definice: „*Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací*“.

Kompozity lze rozdělit podle materiálu na syntetické, které jsou ve značné převaze, nebo přírodní, kde typickým zástupcem je dřevo, které má matici ve formě ligninu a výztuž celulózová vlákna.

Tyto materiály se vyznačují jednou významnou vlastností tzv. synergismem (viz Obrázek 1), což znamená, že výsledné vlastnosti jsou lepší, než kdybychom sečetli dílčí vlastnosti jednotlivých fází. Další výhodou představuje fakt, že se kvůli různým výběrům a poměrům matrice vs. výztuž, popřípadě i výběrem zpracování, může upravit výsledná pevnost, vodivost, váha, ale například i cena.



Obrázek 1 Synergické chování matrice a výztuže [1]

Obecně kompozitní materiály se dělí dle typu matrice a výztuže. S ohledem na geometrický tvar se rozdělují výztuže na částicové a vláknové (viz Obrázek 2), které se dále dělí na kompozity jednovrstvé s dlouhými (kontinuálními) a krátkými vlákny, nebo vícevrstvé, kam se řadí lamináty a sendviče. Mezi sendviče patří takový kompozit, který se vyznačuje použitím aspoň dvou různých výztuží, většinou se jedná o kombinaci vláken s voštinou, pěnou či korkem. Částicové se vyznačují tím, že jeden rozměr útvarů výztuže nepřesahuje ostatní rozměry. Tvary mohou být kulovité, destičkovité, tyčinkovité, nebo nepravidelné a mohou se lišit rozměry. Zlepšují vlastnosti jako jsou ořezuvzdornost, tvrdost a odolnost při zvýšených teplotách. Velmi rozšířené částicové výztuže jsou kovové nebo skleněné. Vláknové výztuže mají naopak jeden rozměr výrazně větší. To má za následek kombinace různých možností uspořádání; např. rohože nebo jednosměrné (roving). Tyto výztuže jsou charakteristické vysokým modulem pružnosti, pevností v tahu, a někdy i houževnatostí. Typy vláken jsou buď organická – polymerní (aromatické polyamidy, aromatické polyestery, polyethylen-naftanát), přírodní (bavlna, konopí, juta, len) nebo anorganická (uhlíková, skleněná, keramická, borová).



Obrázek 2 Kompozitní materiály s různým tvarem geometrické výztuže [1]

Další složkou je již zmíněná matrice. Mezi nejrozšířenější typy patří polymerní, ty lze dělit na reaktoplasty a termoplasty, následují kovové a keramické. Hojně používanými reaktoplasty jsou nenasycené polyesterové a epoxidové pryskyřice. Relativně nově používané termoplastické matrice nemají zatím tak široké uplatnění, do této kategorie patří polyimidy nebo polyethylen. U kovových matric se využívají lehké slitiny titanu, hliníku a hořčíku pro své vlastnosti – houževnatost a tvárnost. Slitina niklu je využita u kompozitů, které musí odolat velmi vysokým teplotám a pro dobré elektrotechnické vlastnosti se používají slitiny stříbra a mědi. Dále keramické matrice mají hlavní použití na zařízeních, kde je potřeba odolnost velmi vysokým teplotám, vyznačují se malou tepelnou vodivostí, elektrickou nevodivostí a jsou známé svou velkou tvrdostí, ale zároveň jsou křehké. Řadíme mezi ně matrice na bázi oxidů (Al_2O_3 , oxidická skla) a jiná (SiC , Si_3Ni_4 , grafit).

Obecně lze říci, že byly objeveny díky leteckému průmyslu a druhé světové válce, jelikož hliníková letadla přestala být výhodná, vzhledem ke korozi, která u nich mohla ochotně nastat, a k omezeným možnostem pevnosti spojených s váhou. V současné době dochází, taktéž především díky leteckému, vojenskému a kosmickému průmyslu, k rozvoji termoplastických matric. [1], [2], [3]

2.2 Materiály využívané pro kompozity

2.2.1 Gelcoat

Složka, která se nanáší jako první do separované formy sprejem nebo pomocí štětečku a zajišťuje nejen vysoký lesk povrchu výrobku, ale také slouží jako ochrana laminátu, nejčastěji proti vodě. Gelcoaty jsou buď na bázi polyesterových, nebo epoxidových pryskyřic. Tloušťka nanesené vrstvy by se měla pohybovat v rozmezí 0,4 – 0,5 mm. Vytvrzení nastane za 1 až 2 hodiny. Gelcoat může být transparentní nebo obsahuje pigmenty, ovšem v tom případě je třeba brát v potaz, že tak jako u nátěrových hmot i tady mají omezenou životnost, vzhledem k působícímu UV záření a vzdušné vlhkosti. Jsou na ně kladeny odlišné požadavky při aplikaci, například ve stavebnictví se požaduje nízká hořlavost, případně samozhášivost a vysoká trvanlivost. K dispozici jsou již ohnivzdorné produkty, ale nemají takovou odolnost na povětrnosti, jako ty neohnivzdorné. Obecně se udává životnost gelcoatů u obkladů budov více než 25 let a u námořnických aplikací více než 35 let. [1]

2.2.2 Termoplastické matrice

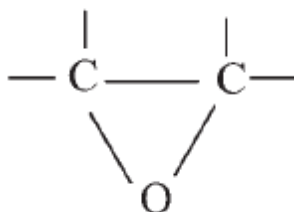
Relativní novinkou v oblasti matric jsou termoplasty. Na rozdíl od reaktivních pryskyřic neboli termosetů se jedná za standardních podmínek o pevné látky, které se navíc liší způsobem zpracování a uživatelskými vlastnostmi. Proto k jejich použití jako matric je za potřebí dosáhnout teploty kolem 200 °C, aby byly dostatečně tekuté. Ke snížení viskozity by se mohla využít rozpouštědla, ale to se neprojektuje, vzhledem k tomu, že i při jejich úplném odstranění se sníží odolnost proti korozi při napětí. Výhody oproti termosetům jsou neomezená doba skladování, dá se využít na velkosériovou výrobu, svařování, vytvrzování, houževnatost a významná je snadná recyklovatelnost. Naopak k nevýhodám patří obtížné smáčení, prosycování a velký lisovací tlak (až 300 N.mm⁻²), nevhodné pro použití metody ručního kladení, vysoká teplota taveniny a malá lepivost. Mezi používaná vlákna se řadí krátká (cca 0,2 mm), využívaná při vstřikování, dlouhá (až 25 mm) a nekonečně dlouhá ve formě tkanin, pásků a rohoží. Z celkového množství používaných matric je ze 65 – 75 % využíváno reaktoplastů, zbytek 25 – 35 % jsou termoplasty, mezi nimi například PP, PA 66, PEI, PEEK atd. Konečnými výrobky mohou být následně nárazníky, rámy sedadel, svařovací helmy, přístrojové desky a letectví. [4], [5]

2.2.3 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Jedná se o roztoky nenasycených lineárních polyesterů v monomerech vznikajících řetězovou reakcí obvykle ve styrenu popřípadě vinyltoluenu, dialkylftalátu nebo methylmethakrylátu. Vyrábí se reakcí dikarboxylových kyselin ve formě anhydridů s dioly, například maleinanhydrid, ftalanhydrid a ethylenglykol. Nepatří mezi dobře odolné na povětrnosti, mají nižší modul pevnosti než epoxidy a po vytvrzení se smršťují, výhodou oproti epoxidovým pryskyřicím je jejich cena. Vhodným výběrem iniciátoru a síťovacího činidla (obvykle styren) se může upravit například teplota vytvrzování. Styren je zde až z 50 % a má za následek snížení viskozity, díky čemuž se polyester lépe zpracovává. Uplatňují se jako zalévací hmoty, při výrobě litých podlah, obkladaček, tmelů, lepidel, syntetického kamene z minerálních drtí, a ve formě kompozitů vyztužených skelnými vlákny jako vlnité střešní krytiny, lodě, pororošty a různé tvary traverz. [1]

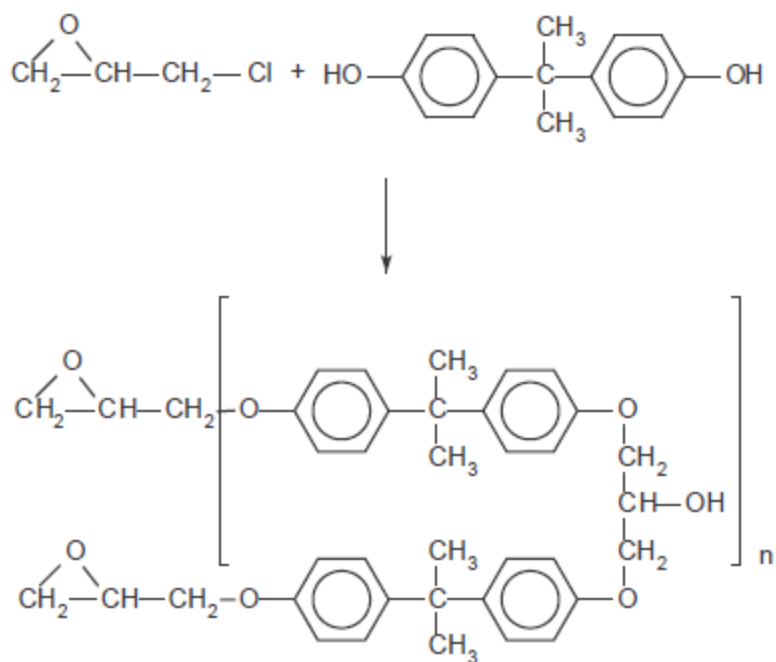
2.2.4 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice se od sebe odlišují například svou barvou – čiré, žlutohnědé až hnědé kapaliny s různou viskozitou, ta je obvykle spíše vyšší, záleží na typu aplikace. Jejich molekula se vyznačuje obsahem alespoň dvou oxiranových (epoxidových) skupin (viz Obrázek 3). Pro své dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti se používají v elektrotechnice jako zalévací a izolační hmoty, dále jako pojiva pro vysokosušinnové dvousložkové nátěrové hmoty, licí podlahoviny, vypalovací laky, adheziva pro lepení kovů, keramiky a skla a nemalý podíl mají na využití pro kompozitní materiály díky své pevnosti, chemické, tepelné odolnosti a odolnosti vůči rozpouštědlům. Hlavními výhodami jejich použití jsou tepelná stabilita (150 – 200 °C), nízká smrštitelnost, kontrola lomové houževnatosti a odolnost větším teplotám než polyuretany, naopak nevýhodou je křehkost, nižší odolnost vůči některým organickým látkám, vyšší cena oproti polyesterovým pryskyřicím a citlivost k vlhkosti. [1], [3], [6]



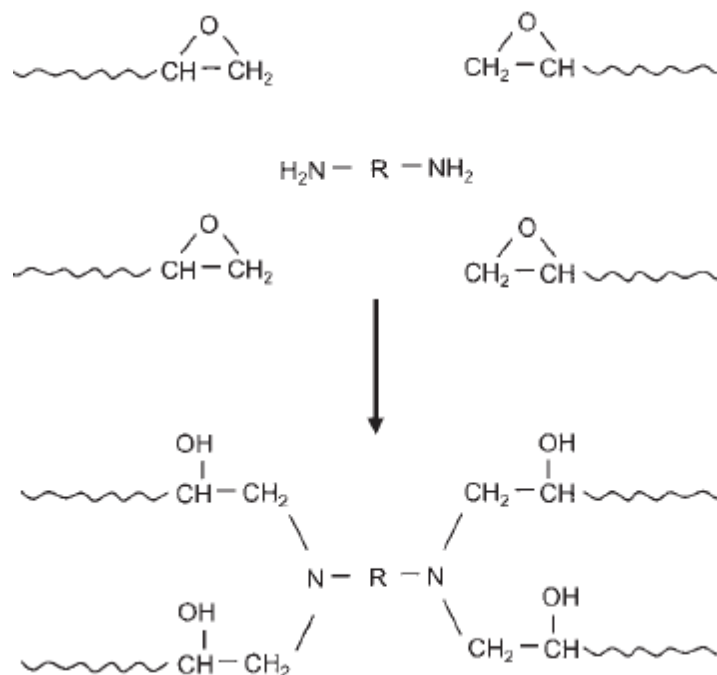
Obrázek 3 Oxiranová skupina [1]

Epoxidové pryskyřice se připravují alkalickou kondenzací epichlorhydrinu s bisfenoly (viz Obrázek 4), kdy nejčastěji používaným je bisfenol A, zvaný též dian. Současně zde probíhají dvě následné reakce. Při té první se aduje epichlorhydrin na fenolický hydroxyl a vzniká dichlorhydrinether a při té druhé za odštěpení chlorovodíku vznikají epoxidové skupiny. Podle způsobu přípravy lze vyrobit buď vysokomolekulární, nebo nízkomolekulární produkt. Vysokomolekulární se připravují především dloužením řetězců nízkomolekulárních pryskyřic pomocí dalšího bisfenolu. Nízkomolekulární vzniká při dostatečném přebytku epichlorhydrinu, kdy vzniká diandiglycidylether bisfenolu A označovaný také jako BADGE. [1]



Obrázek 4 Syntéza epichlorhydrinu s bisfenolem A [1]

Vytvrzování sesíťováním probíhá po přidavku tzv. síťovacího činidla, jímž může být anhydrid dikarboxylových kyselin, nebo polyamin (viz Obrázek 5). Nejčastěji používanými jsou například diethylentriamin (DETA), isophorondiamin (IPDA) nebo triethyltetraamin (TETA). Množství tvrdidel, se vypočítá pomocí vodíkového ekvivalentu aminu a epoxidového ekvivalentu pryskyřice, jinak je poměr dávkování pryskyřice a tvrdidla udáván výrobcem v materiálových listech. Proces vytvrzování je založen na polyadičních reakcích koncových epoxidových skupin a iontové polymeraci. [1]



Obrázek 5 Síťování epoxidové pryskyřice pomocí aminu [1]

Dalším způsobem vytvrzování je pomocí anhydridů dikarboxylových kyselin za zvýšené teploty. Nejprve dochází k otevření anhydridového kruhu reakcí s hydroxylovou skupinou pryskyřice a poté reagují vzniklé karboxylové skupiny s epoxidovou skupinou za vzniku esterových vazeb. [1]

2.2.5 Modifikace epoxidových pryskyřic

Modifikace pryskyřic se provádí za účelem dosažení jejich požadovaných vlastností, a možností, jak to provést je celá řada. Ovšem členění modifikátorů není zcela jednoznačné, jelikož jedna modifikující látka může mít za následek ovlivnění více vlastností.

Obecně se dá říci, že na plniva jsou kladeny 4 základní požadavky – snížit tepelnou roztažnost, cenu, zvýšit tepelnou vodivost a viskozitu. Je důležité však mít na vědomí, že vylepšení jedné vlastnosti může mít za následek zhoršení jiné vlastnosti, proto se primárně vždy hledá nějaký kompromis. [7]

- Změkčování

Proces, při kterém se odstraňují nedostatky epoxidové pryskyřice na bázi dianu, jimiž jsou neohebnost, křehkost a tuhost, nejde však o to dosáhnout vzniku takového materiálu, který by se vyrovnal polyuretanům či kaučukům. Zabrání se tím působení vnitřnímu pnutí, a tedy

popraskání výrobku. Změkčování se může provést dvěma způsoby, buď tzv. vnější (plastifikace), při které se aditivum nepřipojí přímo do řetězce, ale pouze řetězce oddálí a zvýší se tak jejich pohyblivost, nebo druhý způsob tzv. vnitřní (flexibilizace), kdy se aditivum aktivně zapojí do řetězce a svou přítomností ovlivní výslednou strukturu a tím pádem i vlastnosti materiálu. Tento způsob změkčování se využívá častěji. V každém případě je důležité uvědomění, že jeden plastifikátor (flexibilizátor) způsobuje u každého typu pryskyřice odlišný výsledný efekt. Mezi významné plastifikátory patří například dibutylftalát, který zlepšuje odolnost proti tepelnému nárazu, pevnost spojů u lepidel a nevypocuje se, dále estery vyšších mastných kyselin (sebakáty, adipáty, maleináty apod.).

Lze dále dělit látky na monofunkční, kam spadají molekuly obsahující reaktivní epoxidovou skupinu, a které mohou rozpouštět epoxidové pryskyřice. Spadá sem například glycidylethery, epoxidové oleje, estery alifatických a aromatických alkoholů a kyselin, styrenoxid, dipentenmonooxid atd. Větší technické upřednostnění se dává spíše polyfunkčním flexibilizátorům, které se vyznačují obsahem dvou nebo více reaktivních skupin schopných zreagovat s epoxidovou skupinou nebo tvrdidlem a zabudovat se do sítě při vytvrzování. Řadí se sem flexibilizátory obsahující glycidylové skupiny, které se syntetizují z polyglykolů a epichlorhydrinu, kdy výsledné produkty mají například označení DER 732, DER 741 apod. Používají se v kombinaci s aminovými tvrdidly, jelikož v případě anhydridů se dají použít samotné polypropylenglykoly. Flexibilizátory obsahující na konci řetězců hydroxylové skupiny jsou připravené polymerací ethylenglykolu nebo propylenglykolu, které mají při stejné molekulové hmotnosti nižší viskozitu. V kombinaci s aminovými tvrdidly mají účinek plastifikátorů, naopak s anhydridy a komplexem BF_3 působí jako flexibilizátory. Anhydridové skupiny, které jsou součástí vnitřního změkčovadla, se používají pro epoxidy v elektrotechnickém průmyslu, jelikož mají velmi dobré elektrické vlastnosti i za vyšší teploty a dobrou odolnost proti praskání odlitků. Jejich vytvrzování probíhá za zvýšené teploty 100 až 200 °C. Flexibilizátory s karboxylovými skupinami v molekule jsou polyestery obsahující tuto skupinu na konci makromolekul, vyšší alifatické dikarboxylové kyseliny nebo dimerní popřípadě trimerní mastné kyseliny. V kombinaci s terciárními aminovými tvrdidly, které zde působí jako urychlovač, lze tyto látky použít k vytvrzování, samotné použití kyselin k vytvrzení bez aminů není výhodné, protože doba vytvrzování je dlouhá, je potřebná vysoká teplota a výsledná hustota sítě je nízká, proto se vytvrzuje pomocí anhydridů kyselin. Výsledné produkty mají výbornou odolnost odlitků proti tepelným nárazům a dobré mechanické pevnosti. Zajímavým příkladem je kombinace butylenglykolu a polyesteru kyseliny jantarové při použití jako flexibilizátoru, které vykazují vlastnosti velmi málo závislé na teplotě a vysokou

houževnatost, ta se dá zvýšit ještě vhodnou orientací, například trojnásobným protažením při teplotě 110 °C, kdy vznikají krystalické oblasti s výbornými mechanickými vlastnostmi. Flexibilizátory na bázi aminoskupin, kam se řadí aminoamidy vyšších nasycených nebo nenasyčených polymerních mastných kyselin, polyamidy s NH₂ skupinami na konci řetězců, polyetheraminy a polyalkylminy, mají dvojí využití, a to ještě jako tvrdidla. Konkrétně lze mluvit například o trimethylhexymethylendiaminu, kdy výsledné vlastnosti jsou zvýšená rázová houževnatost, výborná pevnost v tahu a dobré elektrické vlastnosti při vyšší teplotě. Za zmínku stojí polyetheramin, který nepůsobí, oproti většině aminů, dráždivě na pokožku a taktéž zvyšuje houževnatost. Pryskyřice s tímto druhem modifikátoru se hodí jako zalévací hmoty. Kapalné kaučuky (butadienové, butadienakrylonitrilové) využívané ke změkčování epoxidů se podílí na složení dvoufázového systému asi do 20 hmotnostních dílů, jedná se především o takové kaučuky, které obsahují ve své molekule karboxylovou skupinu, která dobře reaguje s epoxidy. Vylepšují nejen rázovou houževnatost a mechanickou pevnost, ale především lomovou energii při zachování téměř stejné tepelné odolnosti jako je u nemodifikovaných epoxidů. [6], [7], [8]

- Zlepšení adheze

K látkám, které zlepšují adhezi, patří například ty, které obsahují karboxylovou skupinu, hydroxylovou skupinu, nebo se jedná o silany, ty mají dobrou soudržnost v kombinaci s ocelí. V mnohých případech se však docílí větší adheze tím, že dochází k apretaci materiálu (vláken, povrchu oceli,...). Více informací o apretaci vláken v kapitole 2.6. [7]

2.3 Separátory forem

Důležitým krokem před zahájením samotné laminace je separace formy. Jinak řečeno se nanese film určité látky (separátoru), a tím se zabrání přilepení laminátu k formě, která se poté může znovu použít. Obecně lze říci, že se nanášejí ve slabé vrstvě, aby byl povrch co nejméně porézní.[3]

2.3.1 Vosky

- Separáční základov  vosk

Jedná se o voskov  žlutobílou krémovitou tekutinu, kter  se pou žív  jako podkladov  vrstva pro separátor PVA (polyvinylalkohol) při laminaci do forem. Při separaci je nutné, aby forma a vosk měli pokojovou teplotu 20 – 25  C. Vosk se do formy nanese m kk m had r kem, aby se vrstva nepo kr bala a po zaschnut i se vosk pe liv  rozle t i. Po vyjmut i výrobku z formy ho lze očistit od vosku pomoc i technického benzínu. [1]

2.3.2 PVA – ECO

Roztok polyvinylalkoholu rozpuštěného ve vodno-alkoholick m prost ed i. Je charakteristick  svou  irou a  modrou transparentn i barvou a alkoholick m zápachem. Pou žív  se na separaci kompozitních (epoxidových, polyesterových, polyamidových a vinylesterových pryskyřic) a kovových forem v mnoha p r padech v kombinaci s použitím vosku, ov šem nanese se a  na aplikovan  vosk. [1]

2.4 Vlákna

Vlákna se radši mezi výztuž a tvo r  tedy kompozity s vláknitou výztuži. Mohou být z různých materiálů jako sklo, uhlík, polymery (aramid), nebo mohou mít p rodn  původ. Rozdělují se na obousm rn , uni-sm rn  a vl knit  rohože ve formě nasekaných provazců vláken. Dle typu orientace se používají za různými u eely. Skeln  a uhl kov  vlákna se velmi využívají v leteckém p r myslu, při výrobě v r vek, člunů a bazénů. [1]

2.4.1 Uspo ad n  vláken – such  forma

Různé druhy splétání vláken mají za následek nap r klad torzn  stabilitu, odli n  velikosti pevnosti v tahu ve směru vláken a samoz rejme i lep i manipulovatelnost. [3]

- P r ze

Je tvořena zakroucenými vlákny (viz Obrázek 6), kter  lze odlišit podle směru kroucen  na tzv. Z-typ a S-typ. Způsob kroucen  zaji t je um st n  vlákna, jde o jednu otáčku na 1 cm, a lep i udržn  nap t i při tkan i a nav jen i. Obvykle jsou men i než roving. [1]



Obrázek 6 Sklená příze [9]

- Roving

Pramenec nekonečně dlouhých vláken, která nejsou nijak zakroucena (viz Obrázek 7) a vykazují velmi vysokou pevnost v podélném směru. Pramenec může obsahovat 1000 až 48 000 jednotlivých filamentů. Většinou jde o vlákna skelná a uhlíková. [1]



Obrázek 7 Uhlíkový roving [1]

- Netkaná textilie

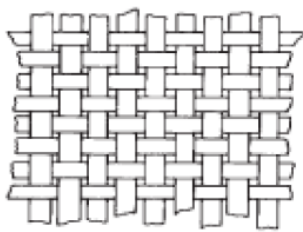
Netkanou textilií tvoří tzv. rohož, která je tvořena sekanými vlákny o délce do 50 mm, aby držela pohromadě, jsou spojena polymerní matricí, která se nanáší na pohyblivý pás, kam se stříkají nasekaná vlákna (viz Obrázek 8). [1]



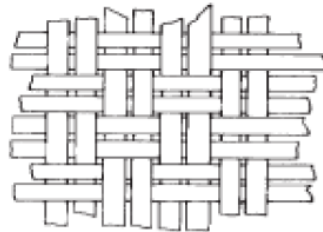
Obrázek 8 Netkaná textilie [10]

- Tkaná textilie

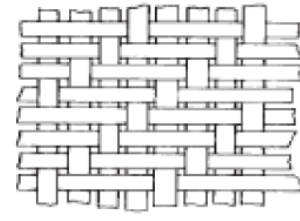
Jak už z názvu vypovídá, tento druh tkaniny vzniká spřádáním vláken, výsledné tkaniny se od sebe mohou lišit typem vazby, který je odvozen od způsobu spřádání. To má za následek různé vlastnosti tkanin. Základními druhy jsou plátno, košík, kepr a atlas (viz Obrázek 9). Nejběžnějším typem vazby je plátno (1 x 1), kdy je zajištěna relativně dobrá stabilita tkaniny. Vazba typu košík se podobá plátnu, ale v tomto případě dvě vlákna překříží další dvě vlákna. Kepr (2 x 2 nebo 4 x 4) a atlas (tzv. 5 - postroj, 8 - postroj až 12 - postroj) mají nižší stupeň zvlnění než plátno, lepší splývavost a tvářitelnost. Ovšem jsou méně stabilní a manipulace s nimi je obtížnější. Vlákna v tkaninách je možno různě kombinovat, tedy se nemusí jednat například jen o skelnou tkaninu, ale skelná tkanina může obsahovat i uhlíková vlákna. V takovém případě se mluví o tzv. hybridních (smíšených) tkaninách (viz Obrázek 10), které slouží za účelem dosažení požadovaných vlastností, nebo při snižování ceny produktu. [1]



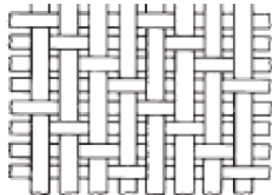
Plátňová vazba



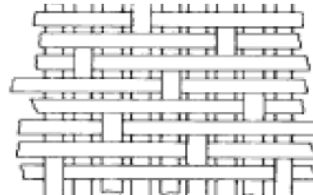
Košíková vazba



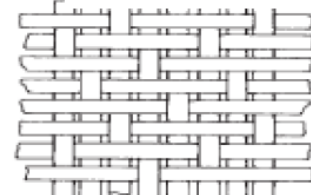
Keprová vazba



Crowfootův atlas



8 vazný atlas



5 vazný atlas

Obrázek 9 Druhy základních vazeb [1]



Obrázek 10 Hybridní tkanina – kevlar-uhlík [11]

- Úplety

Vyrábí se ve dvou formách, a to buď plátňové nebo trubicové (viz Obrázek 11). Kvůli omezené velikosti pletacího stroje jsou dostupné užší šíře a oproti tkaným textiliím jsou dražší. Jsou vhodné na výrobu komponentů s malými průřezy - trubky a tyče. [1]



Obrázek 11 Skelný úplet [12]

- Pásky

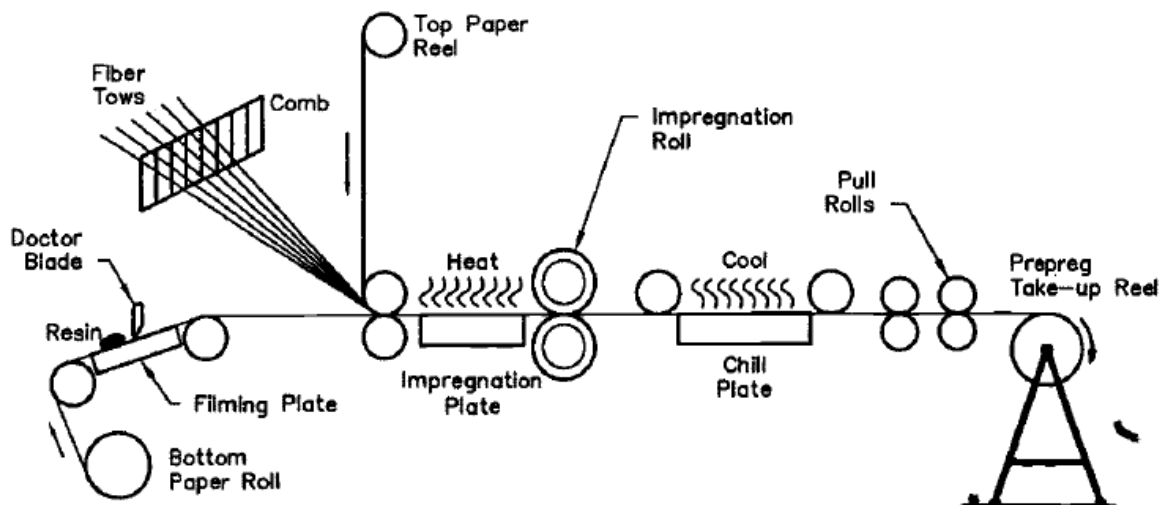
Vychází z rovingu, tedy jednosměrných vláken, ale pro lepší manipulaci jsou prošíty kolmo nití, aby držely svůj tvar pásky (viz Obrázek 12). Obšité jsou i kraje pásky, ale po vytvrzení se tato část odřízne. Druhým způsobem spojení vláken je pomocí nevytvrzeného reaktoplastu, nebo nízko-objemové frakce termoplastického polymeru, což se nazývá prepreg. Pásky mají maximální šířku 100 mm. [1]



Obrázek 12 Uhlíková páska [1]

- Prepregy

Prepreg označuje tkaninu napuštěnou pryskyřicí, jejíž vytvrzení se aktivuje určitou teplotou, záleží na použité pryskyřici v prepregu. Například u epoxidových systémů je to pokojová teplota, proto se uchovávají v chladicích zařízeních. Velkou výhodou je naprosto rovnoměrné prosycení tkaniny, naopak nevýhodou může být jejich skladování. Tohoto typu tkanin se dá využít nejen pro ruční kladení, ale také například při použití autoklávu nebo vakuování. Výroba prepregů viz Obrázek 13. [1]



Obrázek 13 Ilustrace výroby prepregů [1]

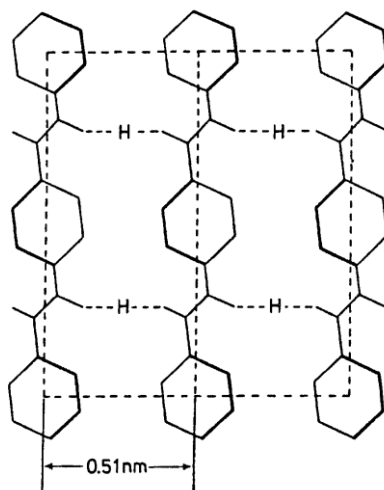
- Whiskery

Ačkoliv se jedná o speciální tenké krystaly, které mají uprostřed jednu šroubovou dislokaci, svým chováním odpovídají dlouhým nespojitým vláknům. Vyrábí se buď pyrolýzou, nebo chemickou reakcí. Průměr mají do 1 mikrometru a délku 3 - 4 mm. Deformace whiskerů je pouze pružná až do hodnoty desetiny Youngova modulu, po jejím překročení se vlákno chová jako běžné monokrystalické. Materiály, ze kterých mohou whiskery být jsou například korund, uhlík, azbest či nitrid a karbid křemíku. [3], [13]

2.5 Druhy vláken

2.5.1 Aramidová vlákna

V roce 1961 byl tento typ vláken představen firmou DuPont. Aramidová vlákna jsou organická vlákna, jejichž součástí je aromatický polyamid (viz Obrázek 14). Na základě jejich orientace se mohou rozlišovat polymery buď meta-, nebo para-. Meta - orientovaná vlákna (např. Nomex) jsou více teplotně odolná a para-orientovaná vlákna jsou zase pevnější (viz Tabulka 1). Nomex je velmi lehké, pevné, tepelně odolné vlákno, které vydrží teplotu i 370 °C. Těchto vlastností se využívá u neprůstřelných vest, přileb i v leteckém průmyslu. Významnou vlastností nomexové tkaniny je malá dýmivost při hoření. [1]



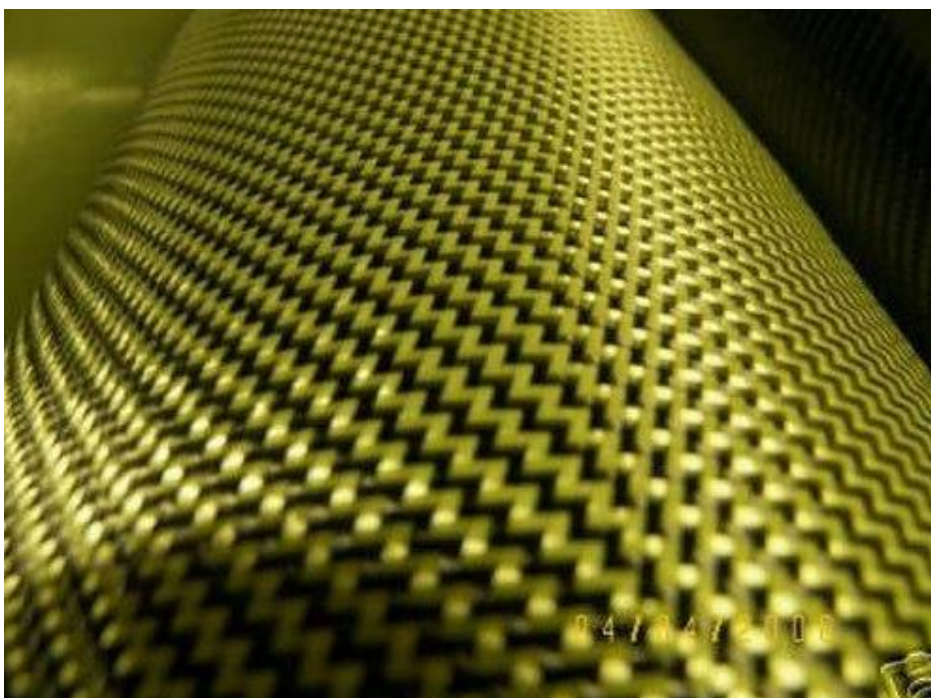
Obrázek 14 Polymerní struktura aramidových vláken [1]

- Kevlarová vlákna

Mezi para-aramidová vlákna patří vlákno poly(p-fenylentereftalamid (PPD-T) pod obchodním označením Kevlar (viz Obrázek 15). Firma DuPont uvedla toto vlákno v 70. letech 20. století. Existují 3 hlavní typy kevlarových vláken - Kevlar, Kevlar 29 a Kevlar 49, které se odlišují svými vlastnostmi, spojuje je však extrémní pevnost a odolnost (viz Tabulka 1), kam se řadí i chemická odolnost, podléhají však působení silných kyselin a louhům. Využití se nalézá v neprůstřelných vestách, přilbách a v leteckém průmyslu jako ochrana proudových motorů, či stupačky v záchranném systému letadel typu Cirrus SR22 a Cirrus SR20 (Cirrus Airframe Parachute System – CAPS). [1], [13]

Tabulka 1 Vlastnosti vybraných aramidových vláken v závislosti na teplotě [1]

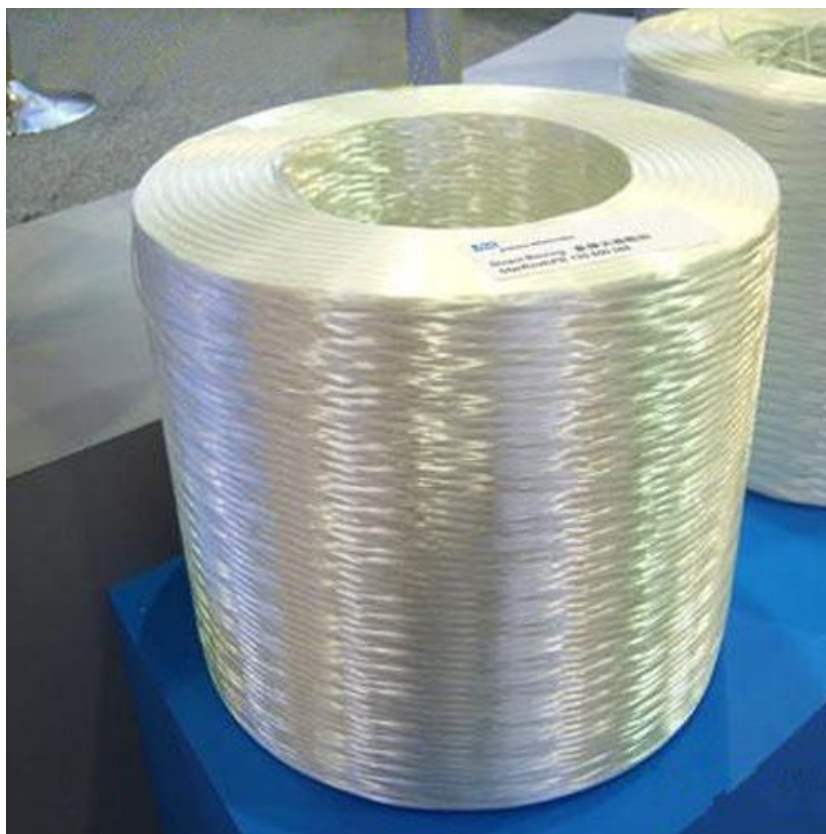
Názvy vláken	Nomex	Kevlar 29	Kevlar 49
Teplota	Pevnost v tahu (GPa)		
150 °C	0,46	2,5	2,7
200 °C	0,39	2,2	2,6
250 °C	0,32	2,0	2,4



Obrázek 15 Kevlarová tkanina [14]

2.5.2 Borová vlákna

Patří mezi keramická vlákna (viz Obrázek 16), která mají využití především v leteckém průmyslu pro svou pevnost a lehkost s obvyklým průměrem 125 – 140 μm . Bor je téměř tvrdý jako diamant a těžko se opracovává, od toho je poté odvozena i výsledná cena vláken, která je v porovnání s uhlíkovými vlákny mnohem vyšší. Typickým znakem je neelastická deformace při prodloužení při zvýšené teplotě. Pro vylepšení adheze s titanovými a hliníkovými matricemi, se vlákna začala potahovat karbidy křemíku, tato vlákna nesou označení „Borsic“. Jsou součástí stíhaček F-14, F15 a B-1 Lancer. Dalším využitím jsou rybářské pruty, rámy jízdních kol nebo golfové hole. Tato vlákna se začala jako první používat k vyztužení kovů. [1]



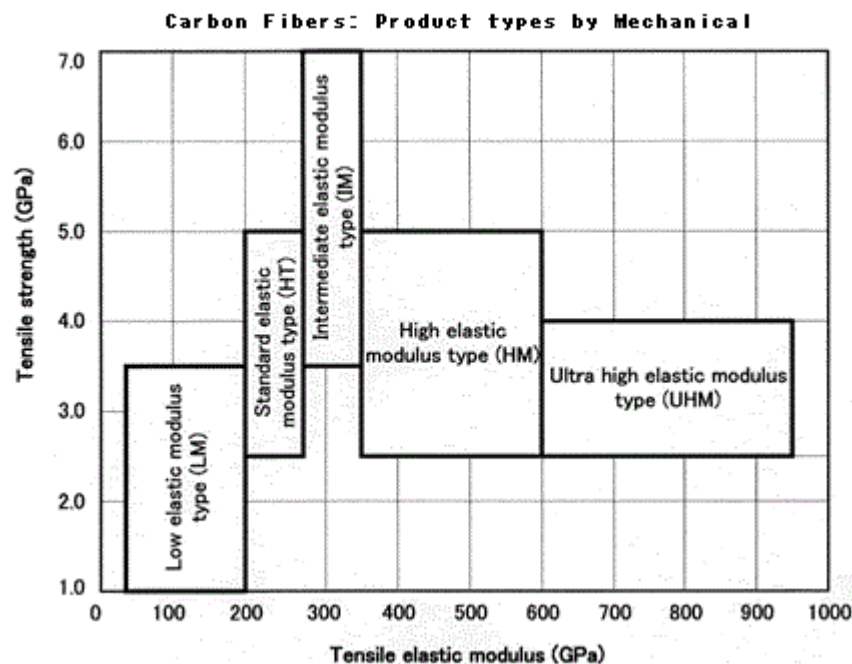
Obrázek 16 Borová příze [15]

2.5.3 Uhlíková vlákna

Mezinárodní unie pro čistotu a aplikovanou chemii (IUPAC) definovala tato vlákna tloušťkou 5-10 μm a minimálním obsahem uhlíku, který má být 92 %. Na trhu se vyskytují od počátku 60. let 20. století. Jsou pro ně charakteristické vlastnosti (viz Tabulka 2), a to především vysoká mechanická pevnost, chemická odolnost, nízká hmotnost, vysoká tepelná odolnost, houževnatost a nízká tepelná roztažnost (viz Obrázek 17). Vzhledem k výskytu těchto vynikajících vlastností se používají v leteckém průmyslu, materiálovém inženýrství a dnes se již dostávají více do rozšířených oblastí, jako jsou sportovní potřeby nebo motoristický průmysl. [1]

Tabulka 2 Rozdělení uhlíkových vláken podle modulu pružnosti a pevnosti v tahu [16]

Typ vlákna	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Pevnost v tahu (MPa)
Ultra vysoce elastický modul (UHM)	600 nebo vyšší	2500 nebo vyšší
Vysoce elastický typ modul (HM)	350 až 600	2500 nebo vyšší
Středně elastický modul (IM)	280 až 350	3500 nebo vyšší
Standardní elastický modul (HT)	200 až 280	cca 2500 nebo vyšší
Nízko elastický modul (LM)	200 a méně	3500 a méně



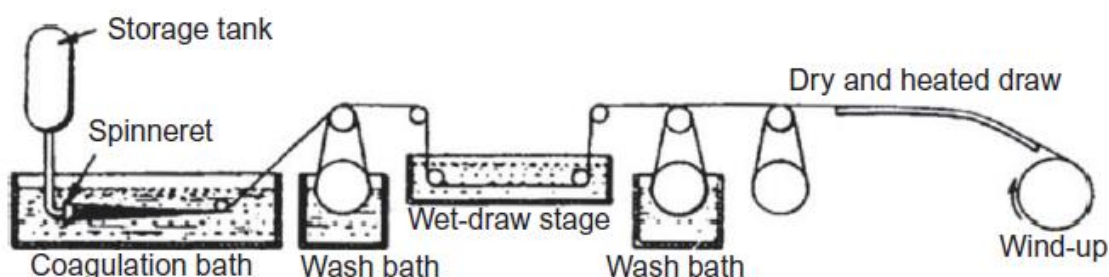
Obrázek 17 Závislost mechanické pevnosti na elastickém modulu pružnosti [16]

Uhlíková vlákna mohou být vyráběna čtyřmi následujícími postupy ze syntetických nebo syrových uhlíkatých vláken na bázi polyakrylonitrilu (PAN), z ropných produktů (smola), umělého hedvábí nebo fenolických pryskyřic (lignin). [1]

Prekurzory

- Polyakrylonitril

Jde o ataktický polymer vhodný pro všechny druhy zvlákňování, ale v praxi se nejčastěji vyrábí mokrým zvlákňováním (viz Obrázek 18), kdy se vytvoří roztok obsahující 10 – 30 hm. % PAN v polárním rozpouštědle, především v dimethylacetamidu, thiokyanátu sodném, nebo kyselině dusičné. Dalším typem zvlákňování je suché, tedy zde není žádné rozpouštědlo a vlákna vznikají vytlačováním a následným sušením v proudu vzduchu. Oproti mokrému jsou výsledná vlákna hladší. Výroba vláken z PAN začíná stabilizací při teplotě 250 °C, kdy se vytvoří stabilní struktura, která má za následek zvýšení teploty skelného přechodu. Dalším krokem je karbonizace, která probíhá při teplotě 1200 – 1600 °C v inertní atmosféře, aby se zabránilo případnému navázání kyslíku a dusíku. Krokem, který může následovat je grafitizace prováděná za vysokých teplot – až 2500 °C a taktéž v inertní atmosféře argonu, aby se předešlo vzniku trhlin. Výsledkem je zvýšení Youngova modulu až na 380 GPa. PAN se vyznačuje teplotou skelného přechodu okolo 120 °C a dobrými tlakovými a tahovými vlastnostmi. [1]

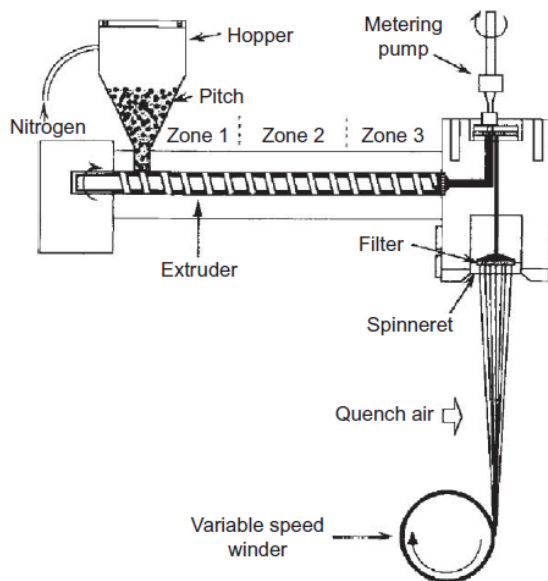


Obrázek 18 Mokrý zvlákňování [1]

- Smola

Krystalická kapalná izotropní látka složená z polycyklických aromatických uhlovodíků získaných z ropy. Způsob výroby vláken je tavné zvlákňování (viz Obrázek 19), může za to dobrá tepelná stabilita mezifáze. Prvním krokem je polymerizace a kondenzace syrové smoly, díky níž nastává změna vlastností a výsledný materiál se stává anizotropním. V koncovém kroku se vlákna stabilizují při teplotě 230 – 280 °C a poté následuje karbonizace při teplotě 1500 – 3000 °C. Výsledné vlastnosti vláken jsou ovlivněny výběrem surové smoly. Avšak nevýhoda smoly se skrývá v nejednotě kvality jednotlivých šarží, proto dochází

k předzpracování a vzniku mezofázové smoly s větším podílem krystalické fáze a lepšími vlastnostmi. [1], [3]



Obrázek 19 Zvlákňování z taveniny užívané pro výrobu mezofázových uhlíkových vláken [1]

- Lignin

K výrobě fenolických polymerů se používá druhý nejrozšířenější fenolický přírodní polymer a tím je lignin. Další využití nachází jako náhradní surový materiál pro výrobu fenolických lepidel, pryskyřic a jiných chemikálií. Vláknna jsou vyráběna zvlákňováním z taveniny a suchým zvlákňováním. [1]

- Umělé hedvábí

Tento prekurzor byl jeden z prvních, který se začal používat na výrobu uhlíkových vláken. Vzhledem k tomu, že se jedná o přírodní materiál, jsou vlákna označována za semi-syntetická. Vysoké náklady, malé výtěžky a zhoršené vlastnosti polotovaru zapříčiňují malé využití tohoto prekurzoru, které se pohybuje okolo 1 %. Výroba vláken probíhá mokrým zvlákňováním, kdy je použit xantogenát celulózy rozpuštěný v hydroxidu sodném, který proudí skrz trysky do koagulační lázně obsahující 10 – 15 % kyseliny sírové. Následně se vlákna vysráží a oxidují se pomocí horkého proudu vzduchu, tím dojde ke zlepšení jejich vlastností. [1]

2.5.4 Grafitová vlákna

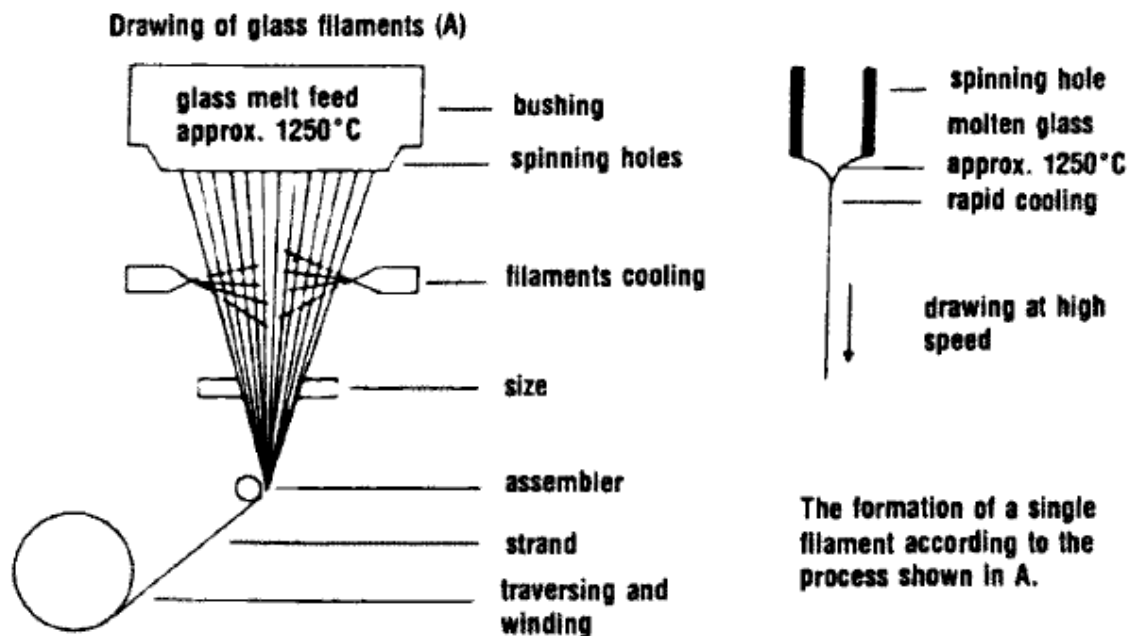
Základem pro grafitová vlákna jsou vlákna uhlíková, ta se spalují při tzv. grafitizaci, kdy dochází ke zvýšení obsahu uhlíku na 99 % a větší. Další podmínkou, kterou tento typ vláken musí splňovat, je trojrozměrné uspořádání atomů. Výsledkem je silná kovalentní vazba, která zapříčiňuje vysoký modul pružnosti (vyšší než 345 GPa). [1]

2.5.5 Skleněná vlákna

Sklo se řadí mezi pevné amorfní látky, jehož hlavní složkou je oxid křemičitý (SiO_2) se směsí dalších oxidů (sodíku, hliníku, hořčíku, boru, draslíku atd. – viz Tabulka 3), které slouží k vylepšení různých vlastností např. snížení teploty tání SiO_2 . Ve skle může docházet k výskytu vad materiálu ve formě submikroskopických inkluzí nebo prasklin. Velikost prasklin se pohybuje v řádech nanometrů, proto je nelze odhalit tak snadno, jako inkluzi, kterou lze vidět pod elektronovým mikroskopem. Skelná vlákna jsou používána pro svou relativně vysokou pevnost, nízkou cenu a například při výrobě anténních kopulí se využívá jejich dielektrických vlastností. Rozdělují se do dvou skupin na tzv. nízkonákladová (obecně užívaná) a na prémiová (speciální).

Velmi využívané v letectví, a tedy i v leteckém modelářství jsou skleněné výztuže – tkaniny, pramence (roving) a rohože, které se vyrábějí z nízkoalkalické skloviny. Průměr skleněných vláken v rovingu se pohybuje v rozmezí 0,009 až 0,013 mm. Skleněná vlákna se používají v náročnějších aplikacích od počátku 60. let 20. století.

Prvním krokem výroby je roztavení skla v peci při teplotě asi 1400 °C, to proudí elektricky vyhřívaným pouzdrem ze slitiny rhodia a platiny nebo zvláknovacími tryskami, ty tvoří 4000 – 8000 otvorů. Sklo prošlé těmito otvory proudí rychlostí až 50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a následně je chlazeno vodní mlhou za vzniku kontinuálních vláken, ta se na konci spojí do řetězce a namotají se na cívku (viz Obrázek 20). [1], [3]



Obrázek 20 Schéma procesu výroby skelných vláken [1]

- Lodní vlákna

Jak už z názvu vyplývá, toto označení nesou skelná vlákna, která jsou určena pro stavbu lodí a nachází se ve formě skelné rohože, tedy krátkých sekaných vláken. Sycení rohože je náročnější na množství pryskyřice, jelikož je jí vyžadováno 1,5 až 2krát větší množství, než-li je hmotnost rohože. [1]

- C-sklo

Pod označením C-sklo jsou k dispozici vlákna tzv. „corrosion-resistant fiber“, což v překladu znamená, že sklo je odolné korozi, tedy působení kyselin, především sírové a chlorovodíkové. V praxi se lze setkat i s označením „chemicky odolné“, a proto se používá v chemickém průmyslu, kde je vyžadována odolnost proti korozi. [1], [17]

- E-sklo

Ve skupině obecně užívaných typů vláken se nalézá E-sklo (vápenato-hlinito-borosilikátové sklo) jehož hlavní vlastností je elektrický odpor. Vyznačuje se dobrými pevnostními vlastnostmi (3 GPa), prodloužením při lomu (3 %) a relativně nízkou cenou. Je součástí plošných spojů v počítačích, anténních kopulí letadel a jedná se o nejvyužívanější typ skloviny na výrobu skelných vláken. Oxid křemičitý ho tvoří až z 50 %, další složkou jsou 5 – 6 hmot. % oxidy boru, hliníku a příměsí dalších sloučenin. Vzhledem k ekologickým závazkům, což je

snížení boru z odpadních plynů, jsou k dispozici i E-skla bez boru. Tato skelná vlákna patří mezi nejpobulárnější, jejich použití činí až 90 %. [1], [4], [13]

- R-sklo (S-sklo pro USA nebo T-sklo pro Japonsko)

Bylo vyvinuto za vojenskými účely v roce 1960. Větší pevnost a odolnost teplotám, oproti E-sklu, je způsobena větším množstvím oxidu křemičitého, hořečnatého a hlinitého, proto je řazeno do skupiny vláken speciálních. Jedná se tedy o hořečnato-hlinito-křemičité sklo, které je lehké a uplatňuje se v leteckém průmyslu. [1]

- S-2 sklo

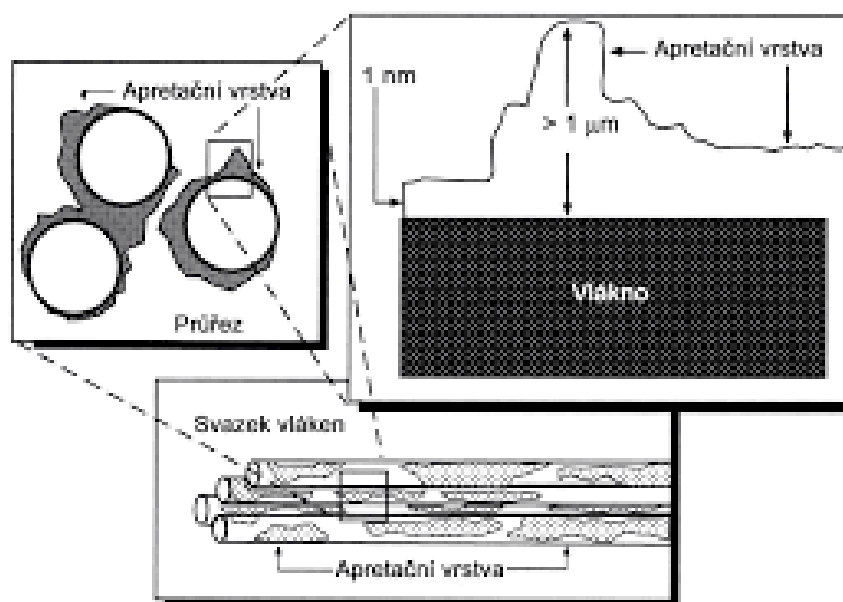
Zhruba o 40 – 70 % převyšuje pevnost E-skla, jedná se především o pevnost v tahu a tlaku. Dalšími významnými vlastnostmi jsou vysoká odolnost vůči nárazu a houževnatost. Současně dobře odolává korozi jako C-sklo – kyselině sírové a chlorovodíkové. Využití nalézá v leteckém průmyslu, a to v interiérech nebo je součástí lopatek vrtulí a podlah, využití tohoto typu skla je i mimo letectví. [1]

Tabulka 3 Vybrané typy skel a jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti [13]

Označení skla	Použití	Složení:	Pevnost [GPa]	Prodloužení při lomu [%]
E	elektrické izolace	55 % SiO ₂ , 11 % Al ₂ O ₃ , 6 % Ba ₂ O ₅ , 18 % CaO, 5 % MgO	3	3
S	vysokopevnostní kompozity	65 % SiO ₂ , 25 % Al ₂ O ₃ , 10 % MgO	5	5
C (Pyrex)	chemické aplikace	65 % SiO ₂ , 4 % Al ₂ O ₃ , 6 % Ba ₂ O ₃ , 14 % CaO, 3 % MgO, 9 % K ₂ O	2	2

2.6 Apretace vláken

Apretace vláken nebo-li úprava povrchu vláken (viz Obrázek 21) za účelem dosažení dobré adheze mezi vláknem a matricí se provádí vzhledem k tomu, že chemické složení vlákna a matrice je odlišné. Někdy je možno se setkat s názvem mezifáze nebo mezní vrstva. Nejčastěji používanými látkami na zvýšení adheze skelných vláken jsou organosilany, které mají nevýhodu, že při kontaktu s nimi nebo vdechnutí jsou toxické, dráždí oči a pokožku, ale jelikož se jich aplikuje malé množství (méně než 0,05 %) a polymerují, tak se tyto vlastnosti zanedbávají. Princip fungování je následující: V nepatrném množství se na vláknech nachází -OH skupiny, ty reagují s nově vytvořenými -OH skupinami, které vznikly pomocí hydrolyzy silanu na -OR skupinách. Dochází k proreagování -OH skupin na vláknech a silanu, za odštěpení kyslíku a tudíž k navázání silanu na vlákno. Výsledná vrstva není tvořena tenkou monomolekulární vrstvou, ale je silnější. Další možností apretace, využívanou například pro aramidová a uhlíková vlákna, je tzv. koronování nebo-li využití vzdušné plazmy. Jelikož uhlíková vlákna neobsahují kyslík, na který by se mohla navázat matrice, musí se na vlákno naapretovat, proto dochází za atmosférického tlaku a vybíjecí síly k výboji, který tak učiní. Existuje řada způsobů vývoje plazmy, mezi nimi například tzv. holá role, krytá role, univerzální typ role, systém foukaného oblouku, nebo vyfouknutí iontů. [4], [18]



Obrázek 21 Náhled apretační vrstvy na vlákne [19]

2.7 Zvlákňování

Proces, který je nutné provést, aby byla získána vlákna ze surového materiálu (skla, uhlíku, aromatických polyaminů atd.).

V prvním kroku zvlákňování se přetvoří prášek, nebo granulát prekurzoru na kontinuální vlákno, poté následuje jeden ze tří možných způsobů zvlákňování.

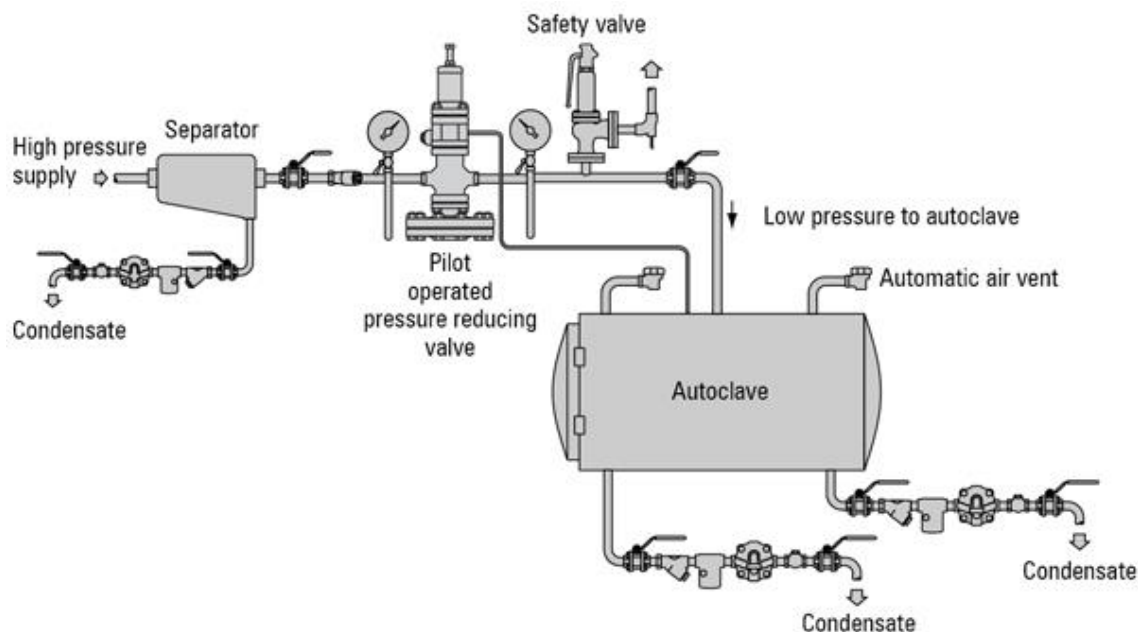
Prvním druhem je mokré zvlákňování, které se provádí tak, že se zvlákňovací tryska s roztaveným granulátem nebo práškem prekurzoru zavede do koagulační lázně a při kontaktu s ní se vysráží vlákno. Druhým způsobem je suché zvlákňování, které se provádí z roztoku prekurzoru, který je umístěn v zásobní nádobě s tryskami, z nichž vytéká roztok, který je hned ochlazován proudem suchého vzduchu, ten zapříčiní rychlé odpaření rozpouštědla a následný vznik vlákna. A posledním typem je zvlákňování z taveniny, které má tři stupně: V první fázi dojde k roztavení prekurzoru, který se vzápětí vytlačuje zvlákňovací tryskou, ve které je velké množství kapilár, a tak dojde k tvorbě vláken. [1]

2.8 Technologie laminování

Při výrobě laminátu je třeba zohlednit řadu aspektů, podle nichž se zvolí výsledná technologie zpracování. Především to jsou typ matrice (reaktoplastické, termoplastické, keramické, kovové), typ výztuže a materiál, z kterého se skládá (uhlík, sklo, aramid, kov, keramika), zda se jedná o malovýrobu, či velkovýrobu, náklady a stroje, popřípadě lidské zdroje. [2], [3], [4]

2.8.1 Autokláv

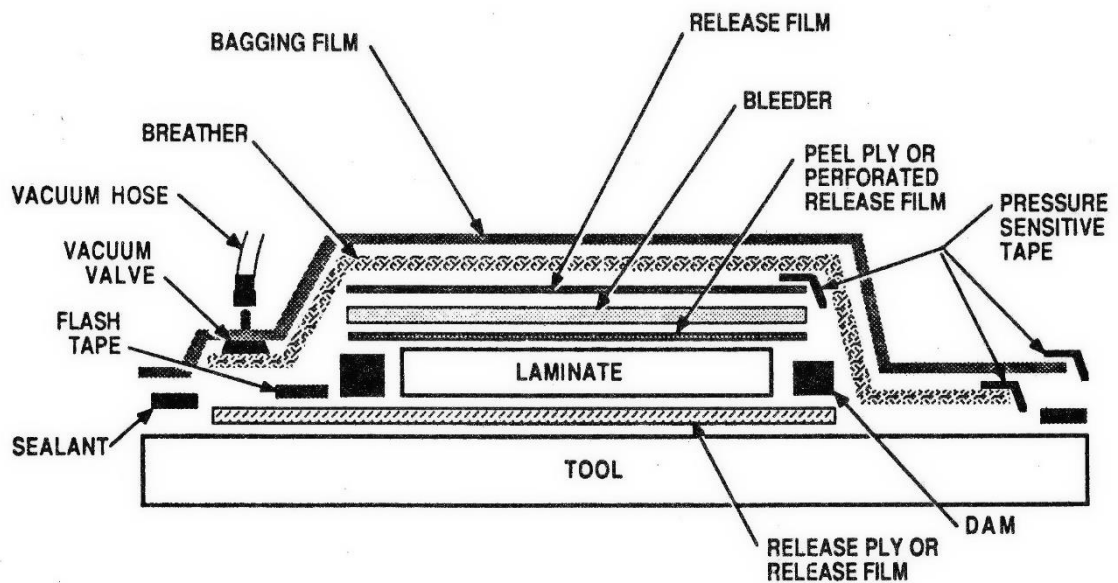
Jedná se o různě velká zařízení, která se vyznačují nastavitelným tlakem a teplotou. Dochází tak k lepší soudržnosti kompozitních dílů, především jednotlivých vrstev (viz Obrázek 22). Použití autoklávu je následující: Výrobek se opatří pružnou fólií a umístí se dovnitř. Nejprve dochází k jeho vakuování pod tlakem cca 0,8 bar a následně je zvýšen tlak na cca 6 bar. Vytvrzování kompozitních materiálů tímto způsobem je aplikováno především na větší díly, které jsou tvořené prepregy, například díly letadel (trupy, náběžné hrany křídel, klapky, atd.) [1], [3]



Obrázek 22 Autokláv [1]

2.8.2 Vakuování

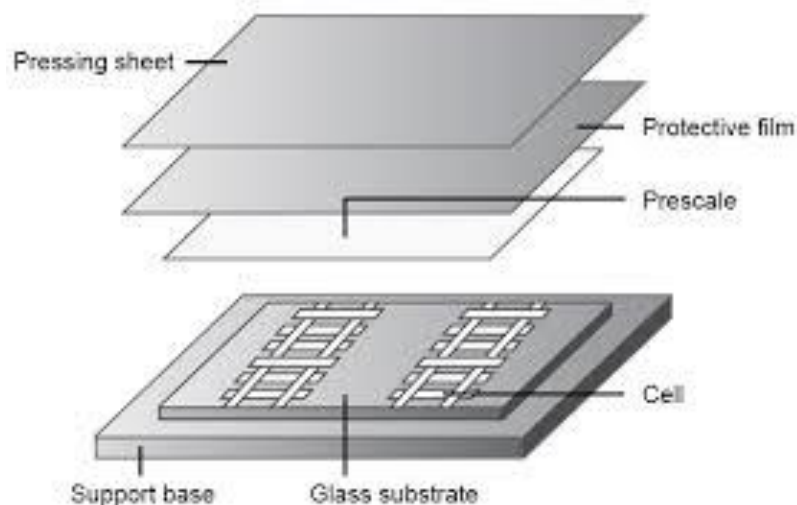
Metoda, při které dochází k rovnoměrnému rozptýření pryskyřice celým vakuovaným dílem (viz Obrázek 23). Principem je podtlak, který zapříčiní především vytlačení vzduchu, který je mezi jednotlivými vrstvami, a tudíž dojde k lepší soudržnosti, což se projeví i na výsledných mechanických vlastnostech. Tento proces, je možné aplikovat dvěma způsoby. První, dalo by se říct suchý způsob, je založen na položení požadovaných vrstev tkanin do separované formy, následované umístěním vrstvy bránící přilepení k fólii pro vakuování, plastové sítě způsobující lepší rozvod pryskyřice, hadiček pro vstup a výstup pryskyřice a speciální hadičky umístěné ve formě ve tvaru spirály, která provede rovnoměrné prosycení. Po obvodu formy je přilepená oboustranná páska, aby nedocházelo k úniku vzduchu. Vzhledem k tomu, že se přebytečná pryskyřice odsává, nemělo by tak dojít k přesycení výrobku, a tedy k dosažení velké hmotnosti. Druhý způsob je prakticky totožný, a mohl by se nazývat mokrá, liší se v tom, že se vrstvy sytí ve formě pomocí válečku, nebo štětce, tak jako je tomu u ruční laminace, na prosycený díl se položí speciální ubrousky, aby pohltily přebytečnou pryskyřici, a nakonec fólie pro vakuování s jedním vývodem do vývěvy. [1]



Obrázek 23 Vakuová infuze [20]

2.8.3 Lisování

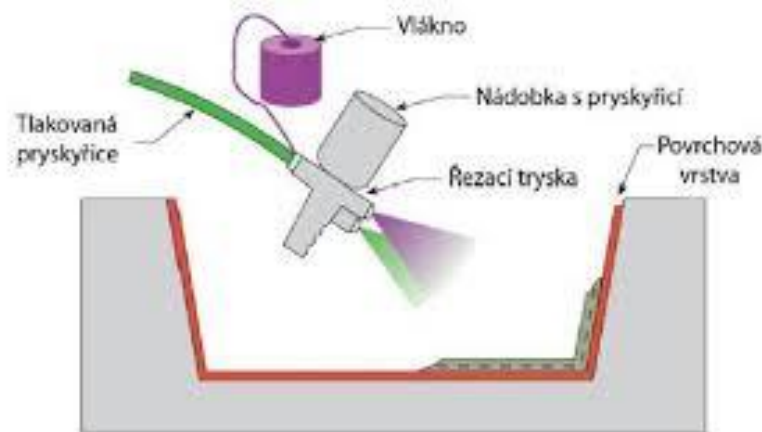
Proces, který probíhá za velmi vysokého tlaku a většinou i zvýšené teploty (viz Obrázek 24) pomocí horkého oleje v potrubí, elektřinou, nebo vodní párou. Zapotřebí je forma z oceli či jiného kovu, rozdělená na dvě i více částí, záleží na tvaru výrobku. Výhodou je vysoká produktivita a kvalitní povrchová úprava, naopak nevýhoda spočívá ve velmi vysokých finančních nákladech. [1]



Obrázek 24 Lisování

2.8.4 Stříkání

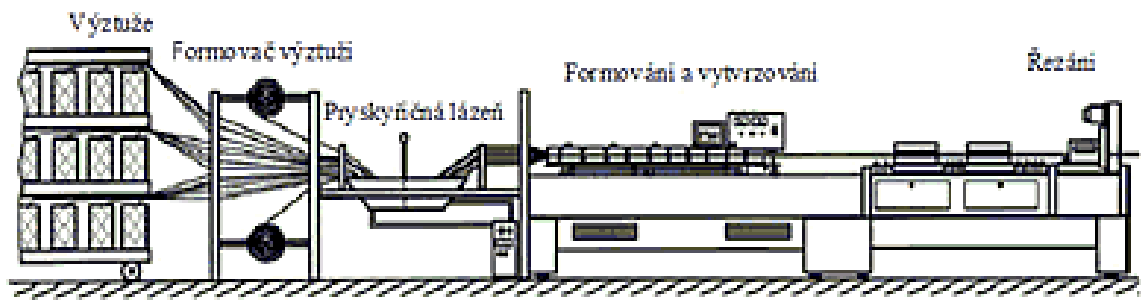
Principem je rovnoměrné stříkání pryskyřice se sekanými vlákny do separované formy pomocí speciální pistole s nádobkou (viz Obrázek 25). Tento proces je mnohdy automatizován, tedy neprovádí jej člověk, ale robot, je to způsobeno tím, že sekaná vlákna a prašné prostředí způsobují respirační problémy. Ke zhutnění celého laminátu se používá rýhovaný, nebo štětinový váleček na dotlačení. Tato metoda se používá například na výrobu bazénů. [1]



Obrázek 25 Stříkání [22]

2.8.5 Pultruze

Automatický proces zpracování kompozitních materiálů, především s využitím termosetů, se skládá ze tří základních částí (viz Obrázek 26). V první řadě podavač výztuže, následován stanicí na impregnaci výztuže a oblastí, kde dochází k formování materiálu do požadovaného tvaru. Více než 90 % výrobků, který jsou vyráběny pultruzí jsou ze skleněných vláken sycených polyesterovou pryskyřicí. Výhody tohoto procesu jsou, že se jedná o proces kontinuální a lze s ním vyrobit například i optické kabely o délce 2,2 km, dále kombinace s jinými materiály, které lze zabudovat do produktu a ušetřené mzdové náklady, jelikož stačí pouze jeden člověk na obsluhu tohoto zařízení. Produkty pultruze mohou být následující: konstrukce, pozemní a lodní doprava, elektronické systémy a zařízení odolávající korozi. [3]



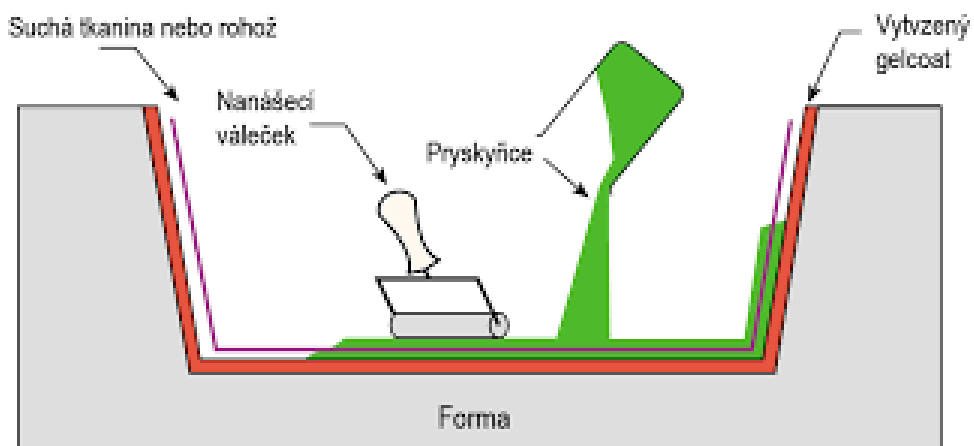
Obrázek 26 Pultruze [23]

2.8.6 Kontaktní ruční laminování

K aplikaci této metody je zapotřebí především zručnost člověka, který ručně, pomocí válečku (viz Obrázek 27), nebo štětce, provádí pryskyřování a kladení vrstev tkaniny a jiných materiálů do formy (viz Obrázek 28). Lépe řečeno dochází k vytlačování vzduchu mezi jednotlivými vrstvami. Důležité je, aby pryskyřice byla rozprostřena rovnoměrně, nevznikla přesycená, nebo naopak nedosycená místa a byl vytlačen veškerý vzduch, jinak by mohlo docházet k defektům jako je delaminace, vznik trhlin apod. Postup laminování je následující: Jeden z nejdůležitějších kroků je separace formy. Nejen, že zabrání přichycení laminátu na stěny formy, ale zároveň je potřeba nanést separátor rovnoměrně v minimální vrstvě, tak aby nedošlo k narušení (hrbolatost, rýhy...) povrchu výrobku. Jako separátory se obvykle používají PVA nebo separovací vosky, které se po aplikaci musí nechat zaschnout. Dalším krokem může být nanesení gelcoatu, vrstvy, která má za úkol chránit povrch výrobku a opět se nechá zaschnout. Poté už může pokračovat samotná laminace. Dochází k nanesení vrstvy pryskyřice a položení vrstvy výztuže, která se k formě přitlačuje již zmíněným válečkem, či štětcem. Jedná se o nejjednodušší výrobní postup, který je vhodný pro výrobu prototypů, malých sérií a dílů s velkou plochou. Tato forma zpracování byla aplikována v této diplomové práci, vzhledem k tomu, že je to stále nejčastější způsob laminace v modelářství. [1], [4]



Obrázek 27 Velurový váleček pro kontaktní laminování [24]



Obrázek 28 Ruční laminace [25]

2.9 Příklady aplikace v leteckém průmyslu a modelářství

Vzhledem k tomu, že se v leteckém, potažmo kosmickém, průmyslu stále vyvíjí nové materiály kvůli náročným podmínkám, které musí splnit, vyskytují se zde především opravdové high-tech materiály, které postupně přecházejí, se snižující se cenou, i do širší oblasti použití. Od raketoplánů, kde se využívá keramických vláken, která odolávají vysokým teplotám až po RC modely letadel. I když tento druh kompozitních materiálů stále není nejlevnější, je možno se s ním setkat u dopravních letadel, kde je zajímavé zmínit typ Boeing 787 Dreamliner, který je tvořen až z 50 % kompozitními prvky (trup, část křidel a kormidla), dále u vrtulníků (rotory) i ultralightů (viz Obrázek 29). Zde je třeba zmínit, že v České republice se nachází firmy, které mají s těmito technologiemi mnohaleté zkušenosti. To by se dalo říct i o sekci modelářské,

jelikož na území republiky se nachází hned dvě světoznámé modelářské firmy (Model Power, Krill model), které vyrábí tzv. obří modely (rozpětí cca 2 – 3 metry) (viz Obrázek 30). Kombinují se zde skelná a uhlíková vlákna s epoxidovou matricí, s využitím ruční laminace popřípadě doplněné o injekční vakuování. [3], [13], [26], [27]



Obrázek 29 Faeta 321 NG [28]



Obrázek 30 RC model letadla Yak 54 [29]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité materiály

- Epoxid L 285

Epoxidová pryskyřice L 285 se používá v kombinaci s různými tvrdidly, které se mimo jiné vyznačují různou dobou zpracovatelnosti, tzv. pot life (45 minut až 5 hodin), v závislosti na použitých vláknech (skelná, uhlíková, kevlarová) se vyznačuje vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi. Mezi významnou vlastnost patří dobrá mechanická odolnost, tepelná odolnost (- 60 °C až + 50 - 60 °C bez temperování, a - 60 °C až + 80 - 100 °C po temperování) a extrémně dobrá fyziologická odolnost. I při nevhodně zvolených podmínkách vytvrzování, tedy vysoké vlhkosti a nízké teplotě, lze dosáhnout nelepivého povrchu a vysokého lesku. Další významnou vlastností tohoto epoxidu je jeho viskozita (600 – 900 mPas při 25 °C), která způsobuje kvalitní a rychlé prosycení vláken. Pro vylepšení vlastností se k němu mohou přidat i různá plniva (bavlněné vločky, skleněné kuličky, kovový prášek, ...). Hustota samotného epoxidu se pohybuje v rozsahu 1,18 – 1,23 g/cm³ při 25 °C, ale při použití tvrdidel, nejčastěji 285, 286 a 287 (viz Tabulka 4) se snižuje na hodnotu cca 0,95 g/cm³ při 25 °C. Hodnota epoxidového indexu je 0,59 – 0,65 a epoxidového ekvivalentu 165 – 170. Výsledné vlastnosti jsou ovlivněny množstvím epoxidového tvrdidla, proto je třeba dodržet správný poměr udávaný výrobcem (viz Tabulka 5). Tato pryskyřice od firmy Lange + Ritter byla použita jako matrice pro přípravu referenčních vzorků v této diplomové práci, vzhledem k tomu, že má hojně využití jak v části modelářské, tak v oblasti letectví, pro které byla schválena německým federálním úřadem pro letectví v roce 1985. Další její využití je v oblasti výroby člunů a stavbu lodí i sportovního nářadí. [1], [30]

- Doporučená tvrdidla pro epoxidovou pryskyřici L285

Tabulka 4 Vlastnosti tvrdidel 285, 286, 287 [1]

	Tvrdidlo 285	Tvrdidlo 286	Tvrdidlo 287
Hustota (25 °C) [g/cm ³]	0,94 – 0,97	0,94 – 0,97	0,93 – 0,96
Viskozita (25 °C) [mPas]	50 – 100	60 - 100	80 - 100
Aminové číslo [mg KOH /g]	480 – 550	450 – 500	450 – 500
Barva	max 3 (*)	max 3 (*)	max 3 (*)

* Vztahuje se pouze k průsvitnému tvrdidlu - tvrdidla mají průsvitně modrou barvu

Tabulka 5 Míchací poměry pryskyřice a tvrdidel [1]

Pryskyřice Epoxid - L 285: Tvrdidlo 285, 286, 287	
Složky váhově	100 : 40 (+/- 2)
Složky objemově	100 : 40 (+/- 2)

- Tvrdidlo 285

Jako tvrdidlo pro vybrané kompozitní materiály bylo použito tvrdidlo 285 (viz Tabulka 4) od firmy Lange + Ritter.

- CHS EPOXY 574

Tato modifikovaná epoxidová pryskyřice na bázi bisfenolu A a bisfenolu F jejímž výrobcem je Spolchemie, a.s. Ústí nad Labem, je bezrozpuštědlový systém určený pro pokročilé kompozitní materiály. V kombinaci s navrženými tvrdidly poskytuje velmi dobré mechanické vlastnosti, vhodnou dobu zpracování a teplotní stabilitu. Použití tohoto systému je vhodné pro skelná, uhlíková, aramidová a minerální vlákna. Dále vykazuje dobrou adhezi k polyesterovým gelcoatům. Systém lze nechat vytvrdit při teplotě 20 – 25 °C, za předpokladu, že má být proces vytvrzování urychlen, lze zvýšit teplotu na 50 – 60 °C. Tato nízkohustotní pryskyřice je vhodná pro ruční laminaci, vakuování, injekční vstřikování, Seemansovo kompozitní injekční vstřikování (SCRIMP) a reakční injekční vstřikování (RIM). Vlastnosti viz Tabulka 6. [31]

Tabulka 6 Vlastnosti CH EXPOXY 574 [31]

Viskozita (25 °C)	[Pa.s]	1,4 – 1,7
Hustota (25 °C)	[g/ml]	1,13 – 1,17
Epoxidový index	[mol/kg]	5,5 – 5,75
Epoxidový ekvivalent	[g/mol]	174 – 182

- CHS EPOXY 582

Tato modifikovaná epoxidová pryskyřice na bázi bisfenolu A, jejímž výrobcem je Spolchemie, a.s. Ústí nad Labem, je bezrozpuštědlový systém určený pro pokročilé kompozitní materiály. V kombinaci s navrženými tvrdidly poskytuje velmi dobré mechanické vlastnosti, vhodnou dobu zpracování a teplotní stabilitu. Použití tohoto systému je vhodné pro skelná, uhlíková, aramidová a minerální vlákna. Dále vykazuje dobrou adhezi k polyesterovým gelcoatům. Systém lze nechat vytvrdit při teplotě 20 – 25 °C, za předpokladu, že má být proces vytvrzování urychlen, lze zvýšit teplotu na 50 – 60 °C. Tato nízkohustotní pryskyřice je vhodná

pro ruční laminaci, vakuování, injekční vstřikování, infúze, SCRIMP a RIM. Vlastnosti viz Tabulka 7. [32]

Tabulka 7 Vlastnosti CHS EPOXY 582 [32]

Viskozita (25 °C) [Pa.s]	0,64 – 0,72
Epoxidový index [mol/kg]	5,78 – 6,06
Epoxidový ekvivalent [g/mol]	165 – 173

- Telalit 0482

Směsné tvrdidlo na bázi aminů. Vlastnosti viz Tabulka 8 a 9.

Tabulka 8 Vlastnosti Telalitu 0482 [31]

Viskozita (25 °C) [mPa.s]	5 – 20
Hustota (23 °C) [g/ml]	0,92 – 0,95
Aminové číslo [mg KOH/g]	550 – 590
Vodíkový ekvivalent [g/mol]	49

Tabulka 9 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [31], [32]

	CHS EPOXY 574	CHS EPOXY 582
Hmotnostní poměr epoxid:tvrdidlo	100: 28 (±2)	100: 30 (±2)
Viskozita (23 °C) [mPa.s]	500	310
Hustota (23 °C) [g/ml]	1,12	1,12
Doba zpracování (23 °C/100g) [min]	285	243

- Telalit 0492

Směsné tvrdidlo na bázi aminů. Vlastnosti viz Tabulka 10 a 11.

Tabulka 10 Vlastnosti Telalitu 0492 [31]

Viskozita (25 °C) [mPa.s]	15 – 30
Hustota (23 °C) [g/ml]	0,93 – 0,96
Aminové číslo [mg KOH/g]	550 – 600
Vodíkový ekvivalent [g/mol]	49

Tabulka 11 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [31], [32]

	CHS EPOXY 574	CHS EPOXY 582
Hmotnostní poměr epoxid:tvrdidlo	100: 28 (± 2)	100: 30 (± 2)
Viskozita (23 °C) [mPa.s]	650	390
Hustota (23 °C) [g/ml]	1,14	1,13
Doba zpracování (23 °C/100g) [min]	60	57

- Telalit 0502

Směsné tvrdidlo na bázi aminů. Vlastnosti viz Tabulka 12 a 13.

Tabulka 12 Vlastnosti Telalitu 0502 [31]

Viskozita (25 °C) [mPa.s]	5 – 20
Hustota (23 °C) [g/ml]	0,93 – 0,96
Aminové číslo [mg KOH/g]	540 – 590
Vodíkový ekvivalent [g/mol]	50

Tabulka 13 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [31], [32]

	CHS EPOXY 574	CHS EPOXY 582
Hmotnostní poměr epoxid:tvrdidlo	100: 28 (± 2)	100: 30 (± 2)
Viskozita (23 °C) [mPa.s]	500	330
Hustota (23 °C) [g/ml]	1,13	1,14
Doba zpracování (23 °C/100g) [min]	160	138

- Telalit 0512

Směsné tvrdidlo na bázi aminů. Vlastnosti viz Tabulka 14 a 15.

Tabulka 14 Vlastnosti Telalitu 0512 [31]

Viskozita (25 °C) [mPa.s]	5 – 20
Hustota (23 °C) [g/ml]	0,96 – 0,98
Aminové číslo [mg KOH/g]	790 – 850
Vodíkový ekvivalent [g/mol]	50

Tabulka 15 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [31], [32]

	CHS EPOXY 574	CHS EPOXY 582
Hmotnostní poměr epoxid:tvrdidlo	100: 28 (± 2)	100: 30 (± 2)
Viskozita (23 °C) [mPa.s]	350	360
Hustota (23 °C) [g/ml]	1,12	1,12
Doba zpracování (23 °C/100g) [min]	30	33

- Telalit 0590

Směsné tvrdidlo na bázi aminů. Vlastnosti viz Tabulka 16 a 17.

Tabulka 16 Vlastnosti Telalitu 0512 [32]

Viskozita (25 °C) [mPa.s]	5 – 15
Hustota (23 °C) [g/ml]	0,94 – 0,96
Aminové číslo [mg KOH/g]	440 – 490
Vodíkový ekvivalent [g/mol]	59

Tabulka 17 Vlastnosti tvrdidla v kombinaci s použitými epoxidovými pryskyřicemi [32]

	CHS EPOXY 582
Hmotnostní poměr epoxid:tvrdidlo	100: 30 (± 2)
Viskozita (23 °C) [mPa.s]	190
Hustota (23 °C) [g/ml]	1,09
Doba zpracování (23 °C/100g) [min]	619

- Silikonový olej v toluenu

Silikonový olej se rozpouští v toluenu a má funkci separátoru formy, chrání povrch od přilepení epoxidových pryskyřic, lepidel, barev a vosků. Vyznačuje se rozsahem provozních teplot od -80 °C do +295 °C. [33]

Toluen je aromatický uhlovodík, který se používá jako rozpouštědlo a řadí se do těkavých organických látek (VOC). [34]

- Skelná tkanina 160 g/m² a 220 g/m²

Obě tkaniny obsahují E-sklo, tedy s dobrými elektrickými a mechanickými vlastnostmi. V případě 160 g/m² jde o keprovou vazbu a u druhé 220 g/m² jde o vazbu plátňovou. Jedná se o skelné tkaniny od výrobce Jino s.r.o., Hradec Králové. [35]

- Skelná netkaná rohož

Jedná se o netkanou rohož M123 vyráběnou firmou Owens Corning určenou pro ruční laminování s gramáží vláken 450 g/m² a průměrem vláken 13 μm, délkou 50 mm a manipulační teplotou -10 °C až +50 °C. Sekaná vlákna jsou spojena práškovým pojivem. Skelná vlákna nesou označení Advantex a znamená to, že vykazují vlastnosti E-skla a odolnost korozi jako E-CR sklo. [36], [37]

3.2 Výroba vzorků

3.2.1 Příprava epoxidových desek - matrice

1. Nejdříve byly sestaveny formy z kovových desek potažené teflonem, svorek a silikonové hadičky (distanční vložky). Bylo naváženo a smícháno cca 150 g epoxidového systému (celkem 10 systémů – standard (L285 + 285) + CHS EPOXY 574 s tvrdidly 0482, 0492, 0502, 0512 a CHS EPOXY 582 s tvrdidly 0482, 0492, 0502, 0512, 0590) a nalito do formy, kde se nechala pryskyřice vytvrdit cca 3 dny při laboratorní teplotě.

2. Desky byly vyloupnuty z forem a nechaly se dotvrdit při laboratorní teplotě po dobu 1 měsíce.

3. Desky byly nařezány na požadované tvary (150x10x4 mm a 80x10x4 mm) a dále testovány na mechanické vlastnosti (pevnost v tahu a ohybu, rázová houževnatost Charpy a tvrdost dle Vickerse). Tyto výsledky přispěly k výběru čtyř systémů, které byly použity pro přípravu skelných laminátů.

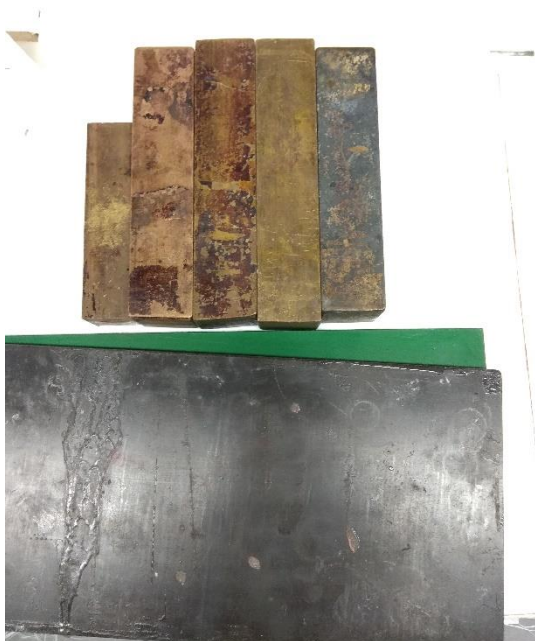
3.2.2 Příprava desek ze skelných výztuží

1. Nejdříve byly vystříženy čtverce jednotlivých skelných tkanin o velikosti 270 x 270 mm (viz Obrázek 31). Jednalo se o skelnou tkaninu s gramáží 220 a 160 g/m² a jednu netkanou skelnou textilií s gramáží 450 g/m², které celkem v kombinaci s jednotlivými epoxidovými systémy tvořily 15 kompozitových desek. Vzhledem k tomu, že byla potřeba výsledná tloušťka 2 - 3 mm, tak bylo použito 10 vrstev skelné tkaniny s gramáží 220 g/m², 13 vrstev tkaniny s gramáží 160 g/m² a 3 vrstvy netkané textilie.



Obrázek 31 Stříhání tkaniny

2. Byl namíchán epoxid s tvrdidlem (celkem 5 epoxidových systémů – viz Tabulky 18, 19 a 20) tak, aby vycházel nespálitelný podíl 45 %. V první fázi se desky, které tvořily formu, potřely separátorem silikonovým olejem v toluenu, aby se výsledný kompozit nepřilepil. Poté byly tkaniny prosycovány. Sycení probíhalo kontaktním laminováním pomocí velurového válečku. Nejprve byla nanesena spodní vrstva pryskyřice a na ní dána první vrstva výztuže, ta se prosytila pomocí válečku a na ní byla položena další vrstva výztuže, která byla opět prosycena. Takto bylo postupováno u všech následujících vrstev. Výsledkem byly prosycené tkaniny (viz Obrázek 32), které byly zatíženy závažím 2200 g (viz Obrázek 33) a nechány vytvrdit při laboratorní teplotě po dobu 1 dne.



Obrázek 33 Zatížení vytvrzovaných desek



Obrázek 32 Vytvrzená netkaná rohož

Tabulka 18 Poměr navážek epoxid:tvrdidlo pro skelnou výztuž s gramáží 220 g/m²

Epoxidové systémy	Hmotnost výztuže [g]	Navážka epoxidu:tvrdidla [g]
285:285	194,87	170:68
574:492	153,66	147:41,16
574:512	164,17	157:43,96
582:502	174,46	164:49,2
582:512	178,31	167:50,1

Tabulka 19 Poměr navážek epoxid:tvrdidlo pro skelnou výztuž s gramáží 160 g/m²

Epoxidové systémy	Hmotnost výztuže [g]	Navážka epoxidu:tvrdidla [g]
285:285	195,68	171:68,4
574:492	149,75	144:40,32
574:512	165,5	158:44,24
582:502	185,98	175:52,5
582:512	174,83	164:49,2

Tabulka 20 Poměr navážek epoxid:tvrdidlo pro skelnou netkanou výztuž s gramáží 450 g/m²

Epoxidové systémy	Hmotnost výztuže [g]	Navážka epoxidu:tvrdidla [g]
285:285	99,22	87:34,8
574:492	83,3	80:22,4
574:512	96,27	92:25,76
582:502	84,52	80:24
582:512	89,21	84:25,2

3. Po vytvrzení bylo odejmuto zatížení, vzorky byly nechány 1 měsíc dotvrdit při laboratorní teplotě a dále byly nařezány ve společnosti SYNPO, a.s. o délce 80 mm a šířce 10 mm pro zkoušku v ohybu a rázovou houževnatost a tvaru „psí kost“ (viz Obrázek 34) velikosti 150 mm a šířce 10 mm pro tahovou zkoušku.



Obrázek 34 Vzorek ve tvaru "psi kosti" pro měření pevnosti v tahu

3.3 Metodika měření

3.3.1 Stanovení aminového čísla

Aminové číslo, zkráceně č.a., se stanovuje u aminových tvrdidel a udává množství mg KOH v 1 g vzorku. Pomocí něj se zjišťuje nejen čistota polyaminů, ale i jejich hodnotící charakteristika. Touto zkouškou však nelze rozlišit, zda se jedná o primární, sekundární, nebo terciární amin, taktéž se nedá stanovit dusík ve formě amidu. Měření bylo provedeno 3x u každého tvrdidla. [38]

Výpočet se provede podle vzorce:

$$\text{č. a.} = \frac{(A - B) \cdot f \cdot 5,611 \cdot z}{n}$$

kde A – spotřeba 0,1 M HClO₄ na titraci [ml]

B - spotřeba 0,1 M HClO₄ na slepý pokus [ml]

f – faktor 0,1 M HClO₄

z – zředovací faktor

n – celková navážka vzorku [g]

3.3.2 Stanovení obsahu epoxidových skupin dle Jaye

Epoxidový ekvivalent se stanoví pomocí titrace na krystalovou violet, kdy přechází do modrozeleného zbarvení. Využívá se tak adice bromovodíku vzniklého in situ z odměrného roztoku HClO_4 a kvartérní amoniové soli. Měření bylo provedeno 3x u každé epoxidové pryskyřice. [38]

Výpočet se provede podle vzorce:

$$\frac{EE}{kg} = \frac{(A - B) \cdot f \cdot 0,1}{n}$$

kde EE/kg – epoxidový ekvivalent/kg

A – spotřeba 0,1 M HClO_4 na titraci [ml]

B - spotřeba 0,1 M HClO_4 na slepý pokus [ml]

f – faktor 0,1 M HClO_4

n – navážka vzorku [g]

3.3.3 Viskozita dle Höpplera

Tato viskozita se stanovuje pomocí Höpplerova rheoviskozimetru. Látka, u které se zjišťuje viskozita, je dána do vybrané kyvety po rysku, a ta se umístí do temperační nádoby, principem je vtlačování vhodné kuličky (s ryskou, nebo bez rysky) při zvoleném závaží, kdy je měřen čas, za který uběhne ručička dráhu 30 mm. Měření bylo provedeno 5x u tvrdidel a epoxidových pryskyřic. [38]

Výpočet se provede podle vzorce:

$$\eta_{(25^\circ\text{C})} = kpt \quad [\text{mPa}\cdot\text{s}]$$

kde k – konstanta kyvety

p – zatížení

t – doba průchodu kuličky dráhou 30 mm

3.3.4 Infračervená spektroskopie

Principem měření je absorpce infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovanou látkou umístěnou v kyvetě, kdy dochází ke změně rotačně vibračních stavů molekul. Takto lze měřit především organické sloučeniny, ale i anorganické. Tato metoda slouží k identifikaci látek a

určení jejich struktury. Výsledkem je tzv. infračervené spektrum, což odpovídá závislosti transmitance na absorbanci.

Vzorky byly odlity do kyvety, která se nachází v infračerveném spektrometru, a prosvíceny infračerveným zářením, díky kterému byl zaznamenán graf, z něhož bylo možné přečíst složení vzorku. Zkouška byla provedena na přístroji FTIR Nicolet iS50 (Thermo Scientific, USA), kdy byl k měření použit rozsah vlnových délek $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ a spektrální rozlišení 2 cm^{-1} . Měření bylo provedeno jednou u všech tvrdidel a epoxidových pryskyřic. [39]

3.3.5 Vytvrzovací charakteristika

Zkouška, která slouží ke stanovení reaktivity epoxidových, nenasyčených polyesterových pryskyřic, jinak řečeno ke zjištění jejich exotermního průběhu vytvrzování. Zkouška se provádí pomocí zapisovače, který se nejprve zkalibruje pomocí vody až k bodu varu a následně se určí směrnice a rovnice přímkou. Měření bylo provedeno jednou u všech epoxidových systémů. [38]

Výpočet se provede podle vzorce:

$$R_p = \frac{T_{max}}{t}$$

kde R_p – reakční poměr

T_{max} – maximální dosažená teplota [$^{\circ}\text{C}$]

t – čas potřebný k jejímu dosažení [min]

3.3.6 Doba želatinace

Doba želatinace je čas, za který dojde ke zgelování systému. Do polypropylenového kelímku se odváží 50 g epoxidového systému a nechá se při laboratorní teplotě stát. Pomocí skleněné tyčinky se zamícháním a vytažením tyčinky ze systému zjistí, zda vlákno, které se táhne od dna kelímku k tyčince, láme. Pokud se „zlomí“, nastává dosažení bodu želatinace. Bylo provedeno jedno měření pro všechny epoxidové systémy. [38]

3.3.7 Extrahovatelný podíl

Pomocí pilníku se připraví cca 1 g pilin vytvrzené pryskyřice, převede se do Erlenmayerovy baňky a přelije se 50 ml chloroformu, kde se třepe po dobu 20 minut. Poté se zfiltruje na předem vysušených fritách S3. Měření bylo provedeno 2x u epoxidových desek. [38]

Výpočet se provede dle vzorce:

$$E = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde m_1 - hmotnost původně navážených pilin [g]

m_2 - hmotnost pilin po extrakci [g]

3.3.8 Stanovení obsahu popela

Principem je stanovení obsahu nespalitelných složek, v tomto případě tedy skelných vláken dle normy ČSN EN ISO 3451-1. Dochází ke spálení v porcelánových kelímkách cca 0,5 g vzorku v peci při teplotě 600 °C po dobu 1 hodiny. Bylo stanoveno, že obsah nespalitelných složek bude 45 %. Po zchlazení kelímků se zvaží. Měření bylo provedeno u laminátových vzorků. [38]

Výpočet se provede dle vzorce:

$$\% = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde m_1 - hmotnost suché navážky zkušební vzorku [g]

m_2 – hmotnost popela [g]

3.3.9 Termomechanická analýza (TMA)

Tato metoda, vzorku o velikosti 5x5x4 mm, je založena na měření změny výšky vzorku v závislosti na čase, teplotě a vložené síle. Je možno měřit teplotu skelného přechodu T_g , bod tání a měknutí, koeficient tepelné roztažnosti (α) a jiné teplotně závislé veličiny. Zkouška byla provedena na přístroji TMA CX04R od firmy R.M.I. Měření bylo provedeno u epoxidových desek. Podmínky měření: síla 50 mN. 1. krok 150 °C o 3 °C/min, 2. krok 25 °C o 3 °C/min, 3. krok 150 °C o 3 °C/min a 4. krok 25 °C o 3 °C/min. [38]

3.3.10 Trhací stroj MTS-4/M

Jde o jednoduchý, kompaktní a jednofázový trhací přístroj MTS Adamel Lhomargy 4/M s mechanickými čelistmi s namontovaným rychloupínacím trnem. Maximální možná síla v tahu i tlaku je u tohoto typu 20 kN. Měření pevnosti v tahu bylo inspirováno normou ČSN EN ISO 527-1,4, pevnosti v ohybu normou ČSN EN ISO 178. Tloušťka vzorků pro skelnou tkaninu 220

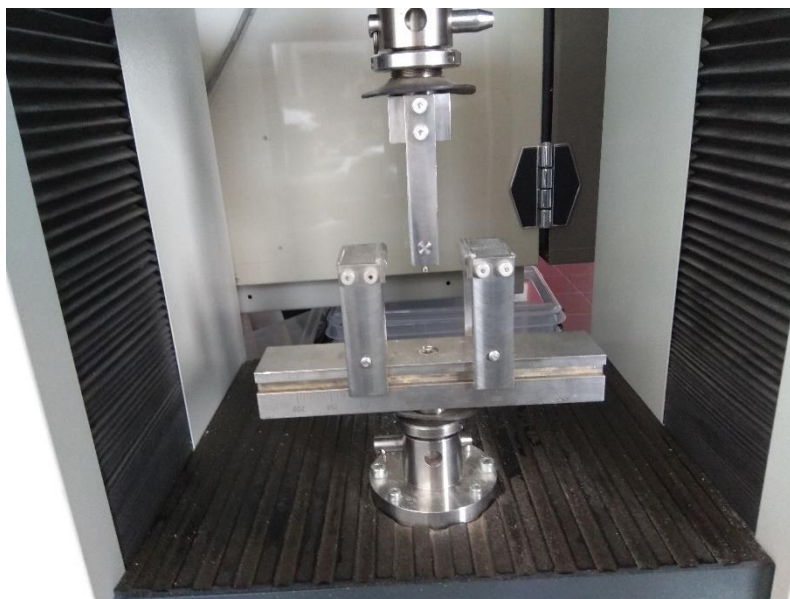
g/m^2 byla cca 2 mm, pro gramáž 160 g/m^2 cca 2,5 mm a pro netkanou skelnou výztuž cca 2 mm.

Zkouška tahem se řadí mezi statické zkoušky, kdy se vzorek umístí do kleštin (viz Obrázek 35) a je natahován silou až do dosažení meze pevnosti, v takovém případě se vzorek buď přetrhne, nebo se naruší jeho struktura. Z výsledků lze zjistit mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, tažnost nebo prodloužení při porušení. Velikost vzorků byla $150 \times 10 \times 2 \text{ mm}$. Podmínky zkoušky pro měření matric a laminátů: upínací délka = 100 mm, rychlost posuvu příčky 5 mm/min. Bylo provedeno minimálně 7 měření pro každý vzorek.

Zkouška ohybem se také řadí mezi statické zkoušky, kdy se vzorek umístí, v tomto případě, do tříbodového zařízení (viz Obrázek 36) umístěného v trhacím stroji a vzorek je ohýbán. Z výsledků lze zjistit mez pevnosti v ohybu, modul pružnosti v ohybu nebo průhyb při maximu. Velikost vzorků byla $80 \times 10 \times 4 \text{ mm}$. Podmínky zkoušky pro měření laminátů: vzdálenost podpěr = 32 mm, rychlost posuvu příčky 1 mm/min. Podmínky zkoušky pro měření epoxidových desek: vzdálenost podpěr = 64 mm, rychlost posuvu příčky 2 mm/min. Bylo provedeno minimálně 7 měření pro každý vzorek. [1], [38]



Obrázek 35 Trhací stroj MTS - 4/M – čelisti na tah



Obrázek 36 Trhací stroj MTS - 4/M – ohyb

3.3.11 Měření rázové houževnatosti pomocí Charpyho kladiva

Podstatou měření rázové houževnatosti pomocí Charpyho kladiva (viz Obrázek 37) je rozdíl mezi nulovým kyvem kladiva a kyvem při nárazu na zkušební těleso, kdy dochází k měření rázové práce potřebné k porušení zkušebního tělesa dle normy ČSN EN ISO 179. Zkouška byla provedena na přístroji Pendulum Impact testing machine WANCE se zatížením 4 J. Měření bylo provedeno minimálně 7x pro každý vzorek. [38], [40]

Výpočet se provede podle vzorce:

$$A_n = \frac{a_n}{b \cdot h} \quad [kJ/m^2]$$

kde a_n - rázová houževnatost [kJ/m²]

A_n - práce potřebná k přeražení tělesa [J]

h - tloušťka zkušebního tělesa [mm]

b - šířka zkušebního tělesa [mm]



Obrázek 37 Charpyho kladivo

3.3.12 Tvrdost dle Vickerse

Zkouška se provádí na univerzálním tvrdoměru Nemesis 9000 – Innovatest (viz Obrázek 38). Jedná se o statickou zkoušku tvrdosti materiálu popsanou v normě ČSN EN ISO 6507-1. Principem je vlačování jehlanu s vrcholovým úhlem 136° (indentoru) pod určitou silou do materiálu. Zkratka pro označení tohoto měření je HV. Byly měřeny vzorky epoxidových desek a laminátů pod zatížením 20 kgf. Bylo provedeno 5 měření. [38]



Obrázek 38 Tvrdoměr Nemesis 9000 – Innovatest

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Charakterizace epoxidových pryskyřic a tvrdidel

Charakterizace používaných epoxidových pryskyřic a tvrdidel se provádí za účelem výběru vhodných epoxidových systémů pro kompozitní materiál, od něhož jsou očekávány požadované výsledky.

Pro charakterizaci epoxidových pryskyřic i tvrdidel byla použita titrace ke zjištění epoxidového ekvivalentu pro epoxidy a aminového čísla pro tvrdidla, Höpplerův viskozimetr pro zjištění viskozity a infračervená spektroskopie pro zjištění složení. Hodnocení epoxidových pryskyřic viz Tabulka 21 a tvrdidel viz Tabulka 22.

Tabulka 21 Charakteristika epoxidových pryskyřic

Epoxidové pryskyřice	Epoxidový ekvivalent [mol/g]	Viskozita dle Höpplera [mPa.s]
L285	5,88	889,64
CHS EPOXY 574	5,59	1821,15
CHS EPOXY 582	5,79	846,91

Naměřené epoxidové ekvivalenty všech epoxidových pryskyřic odpovídají rozsahu ekvivalentům uvedených v technických listech.

Viskozita dle Höpplera u epoxidové pryskyřice L285 odpovídá rozsahu, který je uveden v materiálovém listu. U epoxidů CHS EPOXY 574 a 582 je naměřená viskozita mírně větší, u první zmíněné o 0,1 Pa.s a u druhé 0,12 Pa.s. Při porovnání epoxidů mezi sebou mají L285 a CHS EPOXY 582 velmi podobné viskozity, pryskyřice CHS EPOXY 574 se liší cca o 1 Pa.s ve směru větší viskozity.

Tabulka 22 Charakteristika použitých tvrdidel

Tvrdidla	Aminové číslo [mg KOH/g]	Viskozita dle Höpplera [mPa.s]
285	416,27	96,14
Telalit 0482	553,96	13,66
Telalit 0492	584,56	21,31
Telalit 0502	551,61	14,71
Telalit 0512	786,14	17,66
Telalit 0590	434,93	8,55

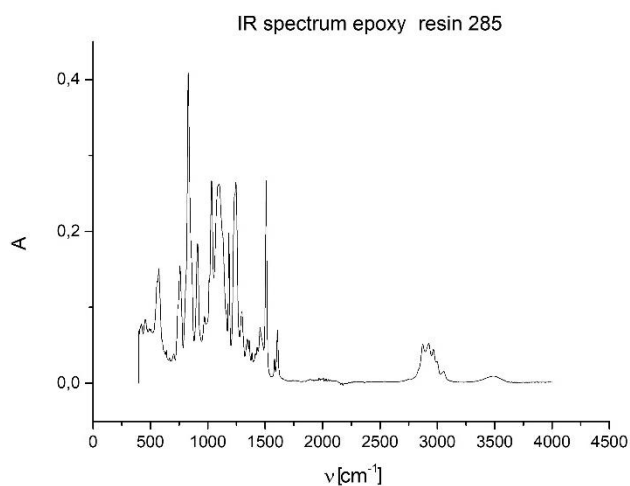
Některé hodnoty aminových čísel se mírně liší od hodnot uvedených v technických listech. V případě tak malých odchylek může být chyba způsobena tím, že stanovení aminového čísla pomocí titrace je z části subjektivní měření, protože záleží na člověku, který uzná, zda se roztok zbarvil již dostatečně, a tak v těchto případech se jedná o rozdíly, které při měření mohou být způsobeny pouze jednou kapkou navíc/míň přikápnutou do titrovaného roztoku.

Viskozita dle Höpplera vychází u všech tvrdidel dle technických listů. Nejvyšší viskozitu má tvrdidlo od standardního systému 285 – 96,14 mPa.s, které je velmi odlišné (cca 5x větší) od ostatních. Hodnoty viskozit u zbytku tvrdidel se pohybují od 8,55 do 21,31 mPa.s.

4.1.1 Infračervená spektroskopie

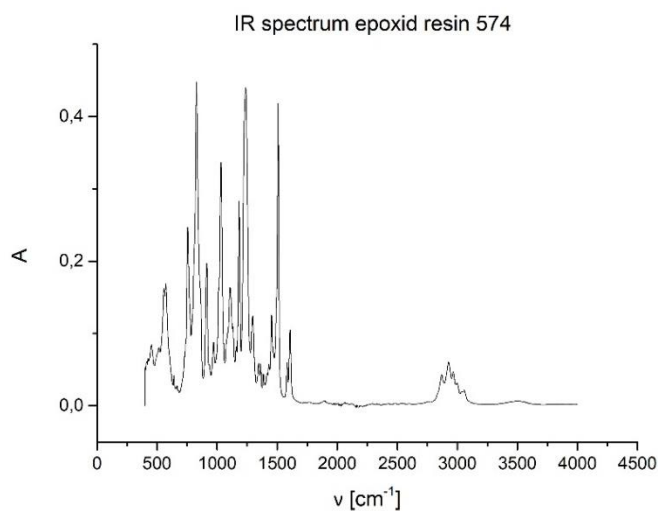
K určení složení vybraných epoxidů a tvrdidel se používá infračervené spektroskopie (IČ), která umožní objevení komponentů, které se nachází v dané chemikálii. Vzhledem k tomu, že se v materiálových listech běžně neobjevuje přesné složení, je tato zkouška velice přínosná, avšak je třeba počítat s tím, že ne vždy se spektra dají lehce přecíst a vždy se nalezne požadovaný výsledek.

Pro zjednodušení byly změřeny i některé chemikálie, které jsou uvedené ve složení výrobcem. Naměřená spektra epoxidových pryskyřic viz Obrázek 39, 40 a 41. Naměřená spektra tvrdidel viz Obrázek 42, 43, 44, 45, 46 a 47.



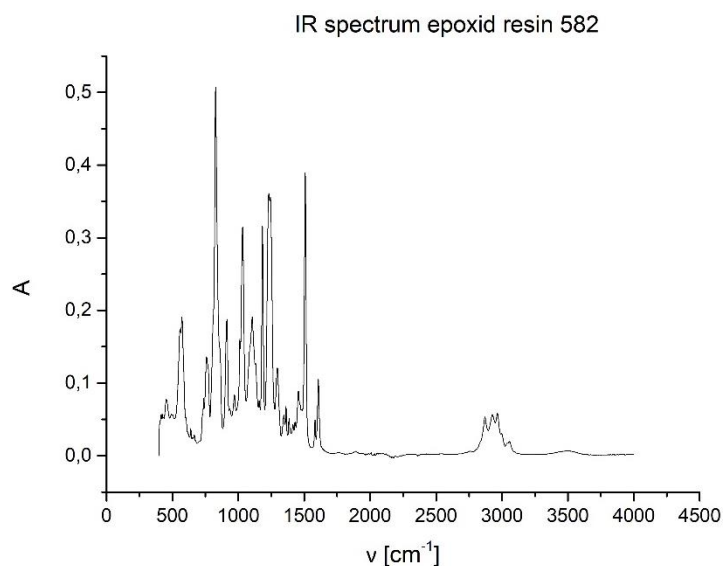
Obrázek 39 IČ spektrum epoxidové pryskyřice L285

Ze spektra je pravděpodobné, že epoxidová pryskyřice L285 obsahuje CH_2 skupiny, bisfenol A (cca 800 cm^{-1}), dále ethery, kolem 3000 cm^{-1} se vyskytují C-H oxiranové kruhy a 3500 cm^{-1} značí přítomnost aromatických sloučenin.



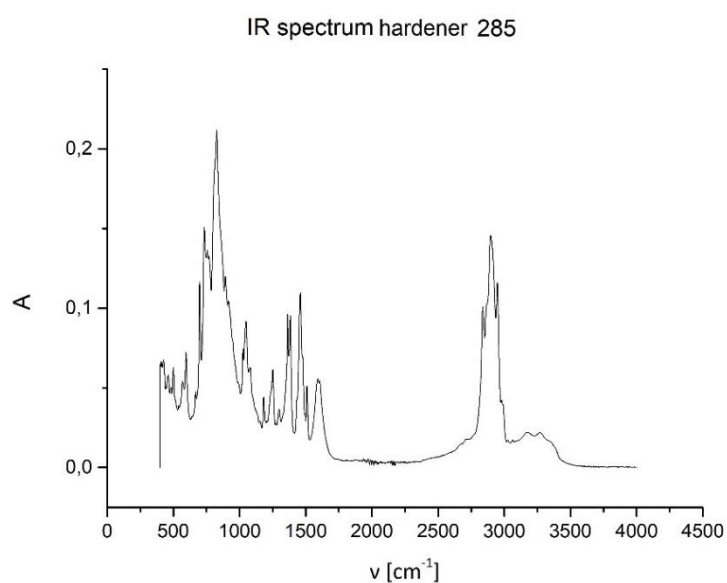
Obrázek 40 IČ spektrum epoxidové pryskyřice CHS EPOXY 574

Ze spektra je pravděpodobné, že epoxidová pryskyřice CHS EPOXY 574 obsahuje CH_2 skupiny, bisfenol A (cca 800 cm^{-1}) a bisfenol F (cca 1200 cm^{-1}), dále ethery, kolem 3000 cm^{-1} se vyskytují C-H oxiranové kruhy a 3500 cm^{-1} značí přítomnost aromatických sloučenin.



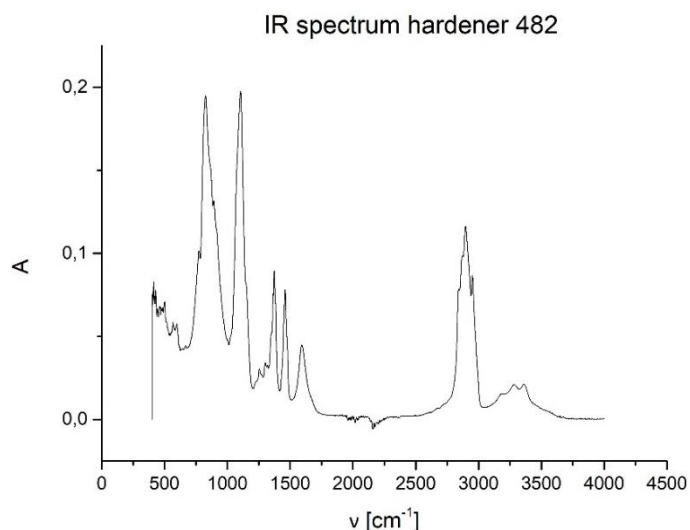
Obrázek 41 IČ spektrum epoxidové pryskyřice CHS EPOXY 582

Ze spektra je pravděpodobné, že epoxidová pryskyřice CHS EPOXY 582 obsahuje CH_2 skupiny, bisfenol A (cca 800 cm^{-1}), dále ethery, kolem 3000 cm^{-1} se vyskytují C-H oxiranové kruhy a 3500 cm^{-1} značí přítomnost aromatických sloučenin.



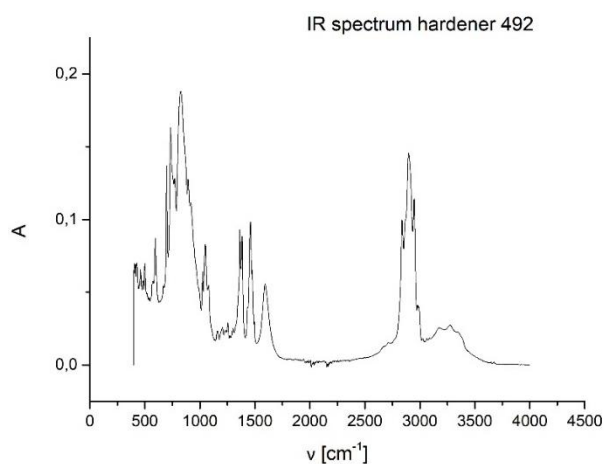
Obrázek 42 IČ spektrum tvrdidla 285

Ze spektra je pravděpodobné, že tvrdidlo 285 je na bázi aminů. Vyskytují se zde jak primární, tak sekundární aminy a mohlo by být na bázi isoforondiaminu, vzhledem k umístění píku cca 800 cm^{-1} .



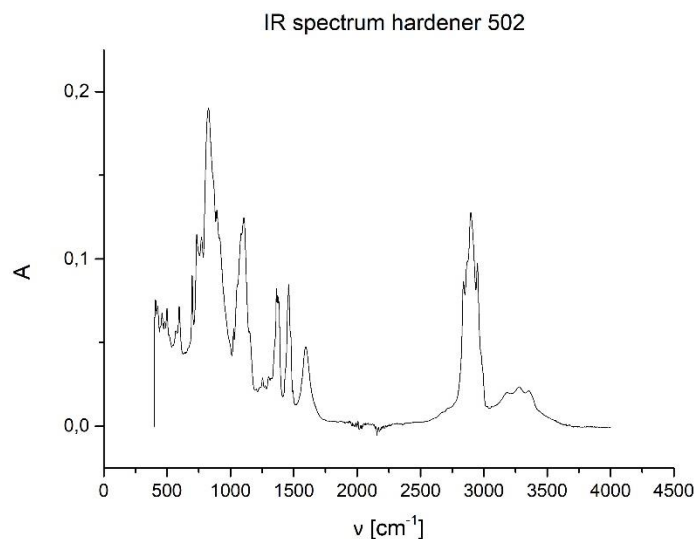
Obrázek 43 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0482

Ze spektra je pravděpodobné, že tvrdidlo Telalit 0482 je na bázi aminů. Vyskytují se zde jak primární, tak sekundární aminy a mohlo by být na bázi isoforondiaminu, vzhledem k umístění píku cca 800 cm^{-1} . Druhou podstatnou složkou by mohl být Jeffamin d230 (cca 1200 cm^{-1}).



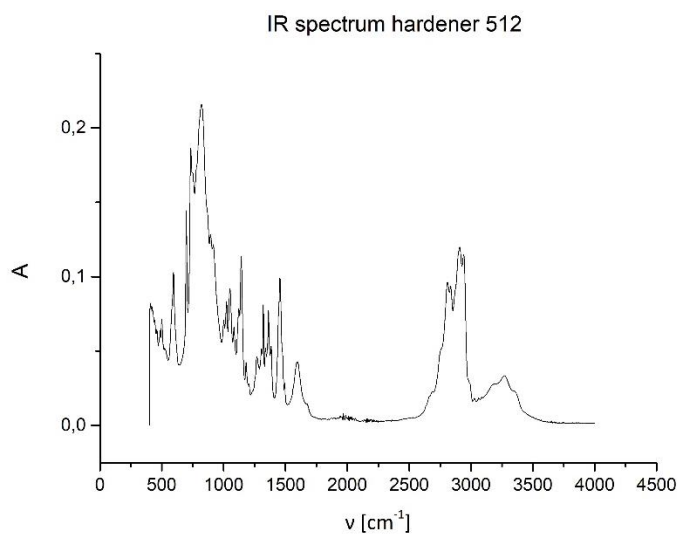
Obrázek 44 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0492

Ze spektra je pravděpodobné, že tvrdidlo Telalit 0492 je na bázi aminů. Vyskytují se zde jak primární, tak sekundární aminy. Součástí by mohl být isoforondiamin (cca 800 cm^{-1}).



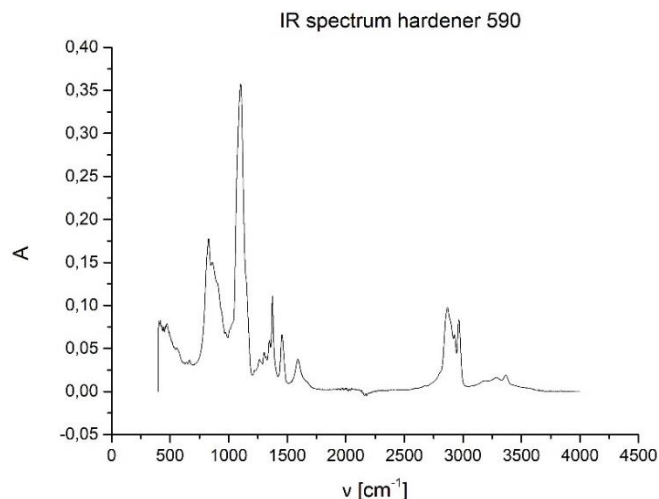
Obrázek 45 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0502

Ze spektra je pravděpodobné, že tvrdidlo Telalit 0502 je na bázi aminů. Vyskytují se zde jak primární, tak sekundární aminy. Součástí by mohl být isoforondiamin (cca 800 cm^{-1}).



Obrázek 46 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0512

Ze spektra je pravděpodobné, že tvrdidlo Telalit 0512 je na bázi aminů. Vyskytují se zde jak primární, tak sekundární aminy. Součástí by mohl být isoforondiamin (cca 800 cm^{-1}).



Obrázek 47 IČ spektrum tvrdidla Telalit 0590

Ze spektra je pravděpodobné, že tvrdidlo Telalit 0590 je na bázi aminů. Vyskytují se zde jak primární, tak sekundární aminy. Součástí by mohl být isoforondiamin (cca 800 cm^{-1}) a Jeffamin d230 (cca 1200 cm^{-1}).

4.2 Vlastnosti epoxidových systémů

Ve výběru matric pro laminování se zohledňuje také doba želatiny a vytvrzovací charakteristika, které jsou důležité pro výběr laminovací techniky s ohledem na komplikované tvary výrobku (počet vrstev, plocha). Pokud se jedná o ruční laminaci, jsou lepší systémy s dobou želatiny okolo 1 hodiny, s ohledem na již zmíněné tvary výrobku a šikvnost laminátora.

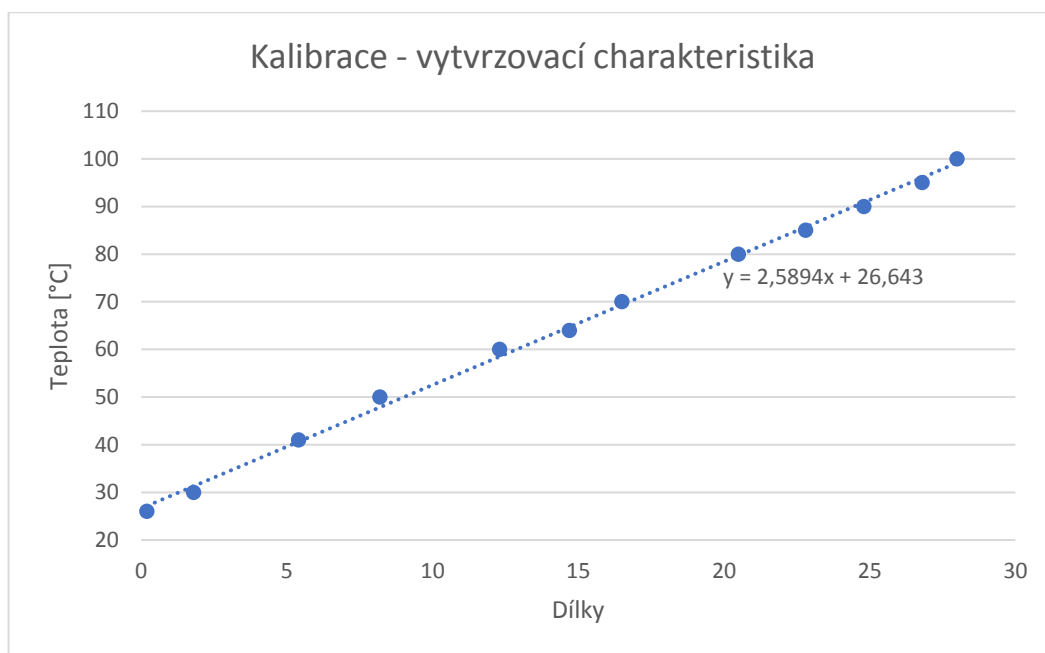
Jednalo se o dobu želatiny, která byla provedena v polypropylenovém kelímku (50 g pryskyřice) a pomocí skleněné tyčinky. Dalším měřeným aspektem byla vytvrzovací charakteristika, která se změřila pomocí zařízení, které průběžně zaznamenávalo rostoucí teplotu systému (100 g pryskyřice), nejdříve však proběhla kalibrace pomocí vody (viz Graf 1). Hodnoty obou měření viz Tabulka 23.

Tabulka 23 Charakteristika matric dle doby vytvrzení

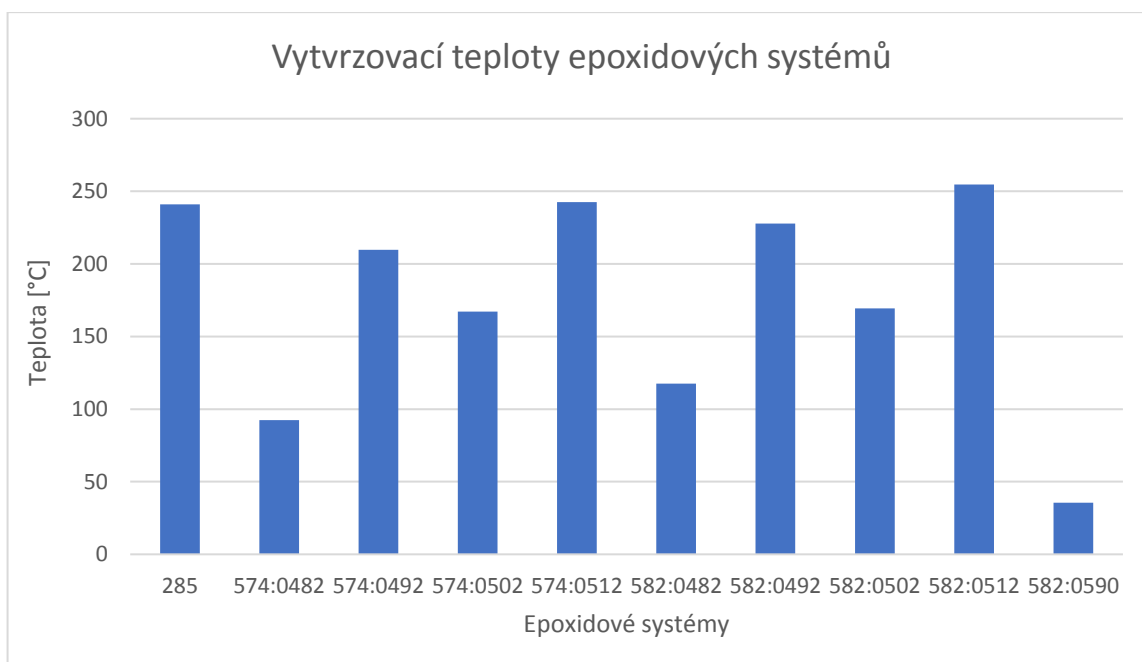
Matrice	Doba želatiny [min]	Vytvrzovací charakteristika		
		t [min]	T _{max} [°C]	Rp
285:285	40	44	241,09	5,48
574:0482	188	328	92,32	0,28
574:0492	65	71	209,82	2,96
574:0502	125	189	167,09	0,88
574:0512	38	36	242,65	6,74
582:0482	180	284	117,59	0,41
582:0492	78	74	227,80	3,08
582:0502	188	211	169,44	0,80
582:0512	35	38	254,63	6,70
582:0590	více než 720	více než 720	35,52	0,05

Doba želatiny pro 50 g není uvedena v materiálových listech (je zde pro 100 g při 23 °C), ale z logiky plyne, že by měla být o něco vyšší, než je pro 100 g. Tuto podmínku nesplňují akorát systémy 574:0482, 574:0502 a 582:0482, jejichž hodnota od uvedené v materiálových listech se liší až o 100 min pro systém 574:0482. Může to být způsobeno chybou měření, vzhledem k tomu, že tato metodika je subjektivní, jelikož záleží na člověku, jak moc míchá systémem a jak často vytahuje tyčinku, aby se podíval na průběh. Čím víc systémem míchá, tím je víc urychlena doba želatiny.

Časy vytvrzovací charakteristiky odpovídají údajům z materiálových listů. Až na systém 582:0590, který má hodnotu větší, než je uvedená (cca o více než 100 minut). Vzhledem k jeho pomalosti, není zaznamenána jeho konečná hodnota vytvrzovací charakteristiky, protože to bylo nad časový rámec. Systém, který dosáhl nejvyšší teploty (254,63 °C) je 582:512, avšak velmi podobných teplot dosáhl i standard a systém 574:0512. Zde je vidět, že vyšších hodnot T_{max} dosahují porovnávané systémy v kombinaci s tvrdidlem 0512. Všeobecně lze říci, že dosažené teploty T_{max}, Rp a t se odvíjí od použitého tvrdidla, jelikož v kombinaci s použitými pryskyřicemi dosahují v obou případech velmi podobných hodnot. Porovnání teplot, které jednotlivé systémy dosáhly lze vidět z Grafu 2. Výsledný reakční poměr je poté u systémů s vysokou T_{max} také vysoký, oproti systémům s dlouhou dobou želatiny (tomu odpovídá i doba vytvrzovací charakteristiky), a tedy i s nižšími hodnotami T_{max}. Opět podobného reakčního poměru dosahují standard, 574:0512 a 582:0512.



Graf 1 Kalibrační křivka pro vytvrzovací charakteristiku



Graf 2 Vytvrzovací charakteristika jednotlivých epoxidových systémů

4.3 Vlastnosti vytvrzených epoxidových systémů

Pro to, aby se daly vybrat další systémy k laminování, je třeba vykonat několik zkoušek celých systémů, jejichž vlastnosti se dále porovnají se zvoleným standardem a na základě nich, proběhne výběr.

4.3.1 Extrahovatelný podíl

Z epoxidových desek byl podle normy nastrouhán na pilníku cca 1 g matrice pro zjištění extrahovatelného podílu, jinak řečeno, jaký podíl reakčních skupin se nepodílí na tvorbě sítě, tedy nezreagovalo (viz Tabulka 24).

Tabulka 24 Extrahovatelný podíl epoxidových matic

Matrice	Extrahovatelný podíl [%]
285:285	8,84
574:0482	21,61
574:0492	22,76
574:0502	17,89
574:0512	20,07
582:0482	9,82
582:0492	16,39
582:0502	12,06
582:0512	14,57
582:0590	8,32

Nejnižší extrahovatelné podíly vykazuje standard a systémy 582:0590 a 582:0482, kolem 9 %, naopak nejvyšší hodnotu má systém 574:0492 a to až 22,76 %. Což značí poměrně vysoký extrahovatelný podíl, který může být způsoben nedokonalým sesítováním.

4.3.2 TMA

Termomechanická analýza se provádí za účelem zjištění teploty skelného přechodu, tedy teploty, kdy nastává změna stavu polymeru v důsledku přesunů makromolekul. U amorfních polymerů je tato změna zlomová a ze sklovitého stavu téměř hned přechází polymer do stavu kaučukovitého, nicméně u sesítovaných reaktoplastů je tomu jinak.

Byly změřeny teploty skelného přechodu u tělísek vyřezaných z desek tvořených epoxidovou matricí o velikosti 5x5x4 mm. Data byla vyhodnocena z grafů proložením tečen v oblasti sklovité a kaučukovité, kdy průsečíkem byla naměřená hodnota T_g (viz Tabulka 25) Celkem bylo provedeno jedno měření pro každý vzorek.

Tabulka 25 Výsledky termomechanické analýzy epoxidových matric

Matrice	Teplota [°C]
285:285	78,3
574:0482	86,6
574:0492	88,3
574:0502	83,6
574:0512	82,9
582:0482	78,3
582:0492	86,5
582:0502	81,2
582:0512	79,6
582:0590	50,1

Teplota skelného přechodu zjištěná pomocí TMA je u standardu 78,3 °C, tu samou hodnotu má i systém 582:0482. Ostatní systémy jsou vyšší než standard, ale jsou velmi blízké a vyčnívá pouze systém 582:0590 s teplotou výrazně nižší 50,1 °C. Nejvyšší teplota je u systému 574:0492 (88,3 °C).

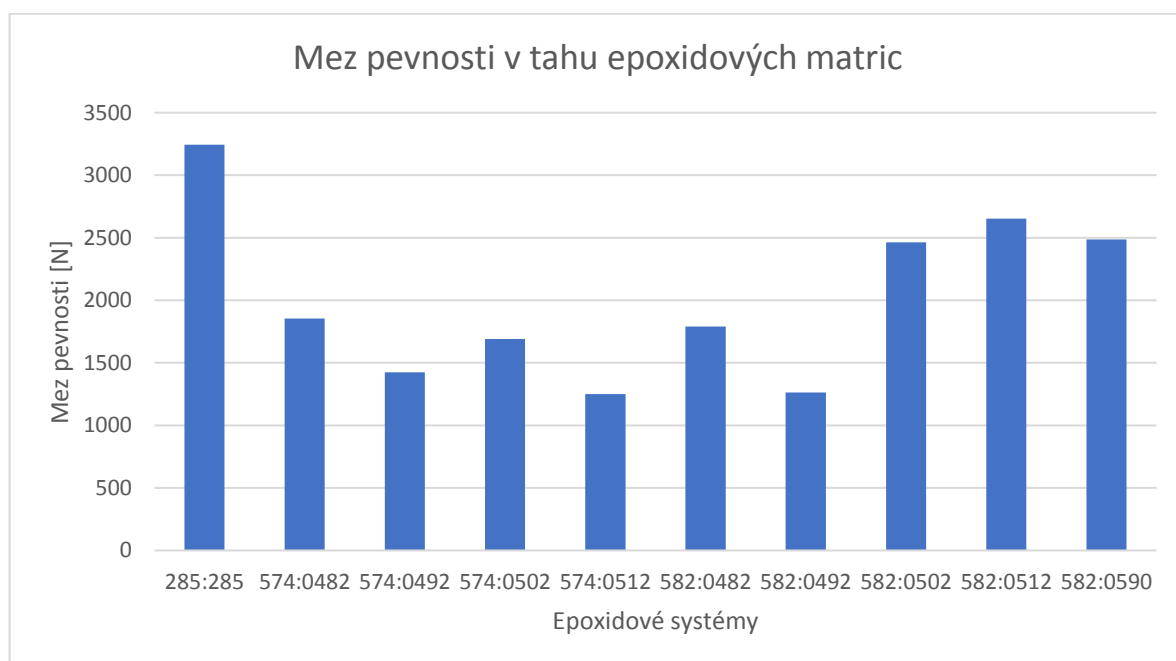
4.3.3 Pevnost v tahu epoxidových matric

Zkouška pevnosti v tahu matric se provádí za účelem zjištění meze pevnosti a jejich tažnosti (viz Tabulka 26). Z naměřených hodnot lze potom určit, která matrice dosahuje podobných, či lepších hodnot než standard (viz Graf 3 a 4).

Pevnost v tahu byla měřena na přístroji MTS-4/M s použitím čelistí na tah. Rychlost měření byla 5 mm/min. Byly měřeny všechny systémy o velikosti tělísek 150x10x4 mm. Celkem bylo provedeno minimálně 7 měření pro každý vzorek.

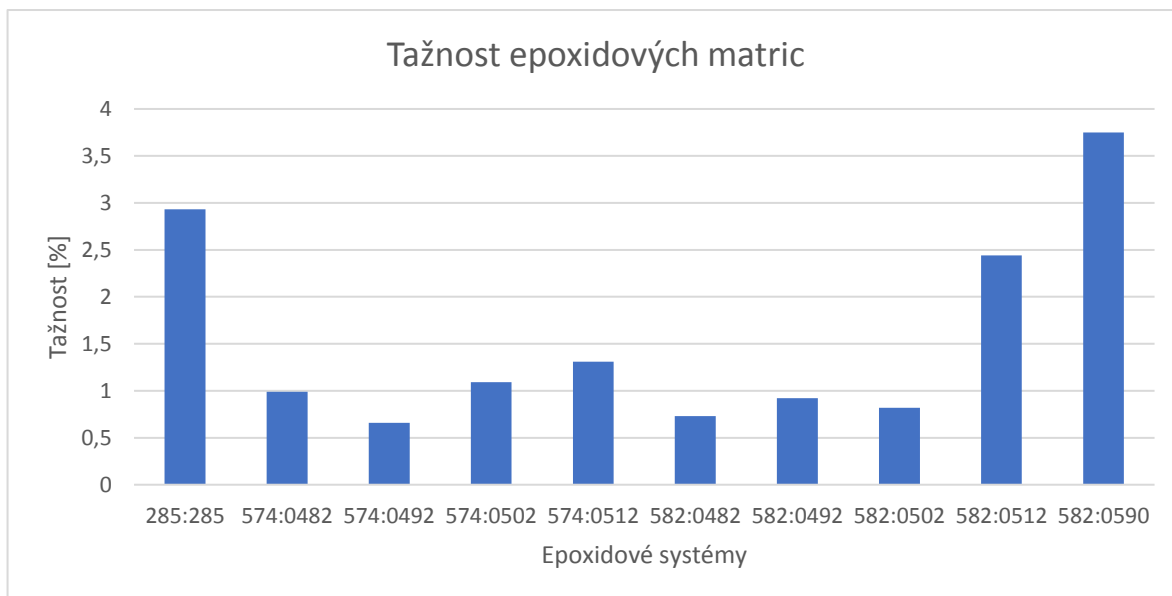
Tabulka 26 Zkouška pevnosti v tahu epoxidových matric

Matrice	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
285:285	3244,32 ± 308,50	66,32 ± 2,68	2,93 ± 0,98
574:0482	1853,32 ± 330,30	37,68 ± 7,23	0,99 ± 0,41
574:0492	1423,48 ± 84,75	29,66 ± 2,43	0,66 ± 0,35
574:0502	1690,13 ± 107,44	37,00 ± 2,83	1,09 ± 0,37
574:0512	1250,80 ± 171,56	35,50 ± 5,96	1,31 ± 0,88
582:0482	1791,44 ± 196,87	39,71 ± 4,80	0,73 ± 0,30
582:0492	1263,56 ± 115,09	43,78 ± 4,48	0,92 ± 0,48
582:0502	2464,16 ± 235,97	47,27 ± 4,65	0,82 ± 0,52
582:0512	2653,00 ± 351,63	55,23 ± 2,78	2,44 ± 0,52
582:0590	2485,16 ± 173,34	52,28 ± 2,93	3,75 ± 0,77



Graf 3 Porovnání mezí pevnosti v tahu epoxidových matric

Z grafu 3 lze vidět, že největší pevnost v tahu má standard (3244,32 N) a z vybraných systémů je to 582:0512 (2653 N) následovaný systémy 582:0590 a 582:0502, ostatní systémy dosahují nižších hodnot kolem 1500 N.



Graf 4 Porovnání tažnosti jednotlivých epoxidových systémů

Z grafu 4 lze vidět, že nejvyšší tažnosti dosahuje systém 582:0590 (3,75 %) následovaný standardem (2,93 %) a systémem 582:0512 (2,44 %) s podobnými hodnotami, ostatní systémy se pohybují okolo 1 %. Zajímavé je, že většina systémů s vyšší mezí pevnosti v tahu má i vyšší tažnost.

4.3.4 Pevnost v ohybu epoxidových matric

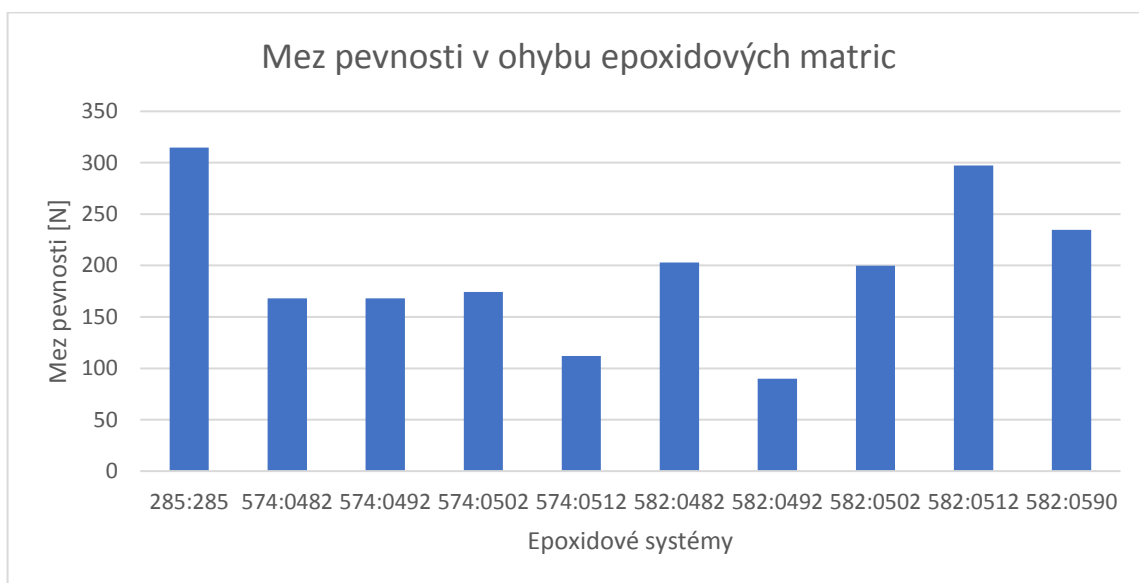
Zkouška pevnosti v ohybu matric se provádí za účelem zjištění meze pevnosti v ohybu, modulu pružnosti a průhybu při maximu (viz Tabulka 27). Z naměřených hodnot lze potom určit, která matrice dosahuje podobných, či lepších hodnot než standard (viz Graf 5).

Pevnost v ohybu byla měřena na přístroji MTS-4/M s použitím třibodového ohybového uspořádání. Rychlost posuvu byla 2 mm/min. Byly měřeny vzorky o velikosti 80x10x4 mm a celkem bylo provedeno minimálně 7 měření pro každý vzorek.

Tabulka 27 Zkouška pevnosti v ohybu epoxidových matric

Matrice	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	Průhyb při maximum [%]
285:285	314,6 ± 14,5	119,78 ± 2,94	3697,83 ± 101,07	4,22 ± 0,08
574:0482	168,10 ± 16,1	71,03 ± 4,94	3878,02 ± 90,65	1,85 ± 0,13
574:0492	168,2 ± 13,2	72,15 ± 6,61	3805,20 ± 127,69	1,94 ± 0,20
574:0502	174,3 ± 7,9	71,18 ± 5,35	3689,91 ± 195,26	1,96 ± 0,19
574:0512	112,00 ± 16,8	94,38 ± 4,41	3786,42 ± 70,74	2,58 ± 0,12
582:0482	202,8 ± 13,3	74,12 ± 3,41	3624,92 ± 110,16	2,10 ± 0,12
582:0492	90,0 ± 10,0	33,96 ± 6,69	3718,75 ± 195,95	2,65 ± 0,13
582:0502	199,7 ± 12,3	82,45 ± 2,33	3521,25 ± 174,48	2,43 ± 0,11
582:0512	297,3 ± 31,5	120,03 ± 3,16	3408,98 ± 35,26	4,21 ± 0,16
582:0590	234,7 ± 12,4	87,97 ± 2,60	2778,97 ± 93,28	4,14 ± 0,15

Hodnoty modulů pružnosti jsou si velmi blízké, okolo 3600 MPa, výrazně se odlišuje pouze systém 582:0590 s hodnotou přibližně 2800 MPa. Průhyb při maximum má u všech systémů velmi malé odchylky a nejvyšších hodnot, okolo 4,2 %, (téměř shodných) nabývá standard se systémy 582:0512 a 582:0590, hodnoty zbytku systémů se pohybují okolo 2 - 2,5 %. Při porovnání s mezí pevnosti v ohybu tytéž systémy vykazují jak nejvyšší průhyb, tak nejvyšší mez pevnosti v ohybu.



Graf 5 Porovnání mezí pevnosti v ohybu epoxidových matric

Nejvyšší mez pevnosti v ohybu vykazuje standard s hodnotou 314,6 N, k němuž se přibližuje systém 582:0512 (297,3 N), oba tyto systémy se také vyznačují nejvyšší hodnotou průhybu při maximu. Naopak nejnižší hodnotu má systém 582:0492 (90 N). Ostatní systémy se pohybují s mezí pevnosti v ohybu kolem 150 N.

4.3.5 Rázová houževnatost matric

Rázová houževnatost byla provedena na vzorcích matric o velikosti 80x10x4 mm pomocí Charpyho kladiva se zatížením 4 J. Celkem bylo provedeno minimálně 7 měření. Naměřené hodnoty viz Tabulka 28.

Tabulka 28 Rázová houževnatost epoxidových matric

Matrice	Práce [J]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
285:285	0,51 ± 0,149	11,2 ± 2,47
574:0482	0,19 ± 0,09	3,5 ± 1,7
574:0492	0,29 ± 0,07	6,27 ± 1,3
574:0502	0,35 ± 0,05	7,09 ± 1,0
574:0512	0,22 ± 0,04	4,99 ± 1,0
582:0482	0,43 ± 0,07	8,76 ± 1,41
582:0492	0,28 ± 0,05	9,4 ± 1,5
582:0502	0,32 ± 0,05	6,64 ± 1,07
582:0512	0,32 ± 0,09	6,88 ± 1,25
582:0590	0,42 ± 0,08	8,83 ± 1,56

Rázová houževnatost u měřených tělísek byla největší u standardu, tedy 11,2 kJ/m². Ostatní hodnoty dosahovaly maxima kolem 9 kJ/m², a to u systémů 582:0492, 582:0482 a 582:0590. Nejmenší rázovou houževnatost vykazuje systém 574:0482 s hodnotou 3,5 kJ/m².

4.3.6 Tvrdost dle Vickerse

Transparentní části desek byly použity pro měření tvrdosti dle Vickerse pod zatížením 20 kgf. Naměřené hodnoty viz Tabulka 29.

Tabulka 29 Tvrdost epoxidových systémů dle Vickerse

Matrice	Tvrdost dle Vickerse [HV 20]
285:285	19,11 ± 0,37
574:0482	21,51 ± 0,64
574:0492	24,06 ± 0,42
574:0502	22,90 ± 0,40
574:0512	20,94 ± 0,50
582:0482	20,73 ± 0,23
582:0492	22,52 ± 0,45
582:0502	21,35 ± 0,20
582:0512	21,27 ± 0,71
582:0590	16,70 ± 0,17

Z naměřených hodnot lze vidět, že systém 582:0590 se zcela odlišuje svou tvrdostí od ostatních systémů (je nejnižší), hodnoty ostatních si jsou naopak velmi blízké. Nejvyšší tvrdosti nabývá systém 574:0492 s hodnotou 24,06. Odchytky tohoto měření se pohybují v malém rozmezí, což je způsobeno kvalitním vylitím matrice do formy.

4.4 Vlastnosti laminátových systémů

Pro zjišťování vlastností laminátových systémů slouží zkoušky, jako jsou obsah nespalitelného podílu, pevnost v tahu, pevnost v ohybu, rázová houževnatost a zkouška tvrdosti. Provádí se za účelem konečného zhodnocení a porovnání použitých epoxidových systémů a výztuží.

Ze zkoušek epoxidových matric byly vybrány 4 systémy (2x s CHS EPOXY 574 a 2x s CHS EPOXY 582), které byly zhodnoceny jako nejlepší, či z experimentálního hlediska zajímavé. K výše zmíněným systémům byl použit standardní systém L285:285, který se běžně používá v letectví, potažmo v modelářství. Byly použity 3 typy výztuží (skelná tkanina 220 g/m² a 160 g/m² a netkaná rohož s gramáží 450 g/m²).

Důvod výběru systému 574:0492 byl následující: doba želatinace, a tedy i vytvrzovací charakteristika, byla kolem hodiny, což bylo ideální pro ruční laminaci desek. Dalšími aspekty byly naměřená tvrdost dle Vickerse a teplota skelného přechodu, které byly nejvyšší ze všech měřených systémů, včetně standardu. Důvod výběru byl i z hlediska tažnosti, která byla naopak nejnižší ze všech měřených systémů včetně standardu.

Důvod výběru systému 574:0512 byl následující: ze zajímavosti byl vybrán z hlediska doby želatinace, a tedy i vytvrzovací charakteristiky, protože je pro ruční laminaci poměrně krátká – kolem 35 minut a teplota při vytvrzovací charakteristice byla téměř shodná s teplotou standardu. Dalšími aspekty byly vyšší teplota skelného přechodu v porovnání se standardem a nejvyšší tažnost a průhyb ze systémů epoxidové pryskyřice CHS EPOXY 574.

Důvod výběru systému 582:0502 byl následující: doba želatinace, a tedy i vytvrzovací charakteristika, byla dlouhá, respektive o cca 2 hodiny větší než u standardu, což byl záměr pro vyzkoušení i pomalejších systémů. Dalšími aspekty byly hodnota extrahovatelného podílu, která se blížila hodnotě standardu, vyšší tvrdost dle Vickerse, vyšší teplota skelného přechodu, vyšší mez pevnosti v tahu a nízká tažnost vztažená ke standardu. Důvodem byla i mez pevnosti v ohybu, která byla u systémů s CHS EPOXY 582 jedna z vyšších.

Důvod výběru systému 582:0512 byl následující: doba želatinace, a tedy i vytvrzovací charakteristika, byla krátká – kolem 35 minut a tvrdost dle Vickerse byla vyšší oproti standardu. Zajímavým výběr byl i z hlediska teploty skelného přechodu, která byla vyšší než u standardu. Důvodem výběru byly dále i mez pevnosti v tahu a ohybu, které byly nejvyšší ze všech porovnávaných systémů, tažnost (druhá nejvyšší u všech porovnávaných systémů) a průhyb při maximu, který byl taktéž nejvyšší ze všech porovnávaných systémů a téměř totožný se standardem.

4.4.1 Obsah nespalitelného podílu

Obsah nespalitelného podílu, tedy v tomto případě skelných vláken, se provádí za účelem zjištění, zda způsob laminování (ruční laminace) proběhla tak, jak měla a došlo tedy ke správnému prosycení.

Byly nařezány nepravidelné útvary laminátů o hmotnosti cca 0,5 g a spáleny při 600 °C, nespalitelný podíl by měl být 45 %, což je používáno v letectví. Celkem byly provedeny 2 měření pro každý systém, z nichž byl spočítán průměr. Hodnoty pro jednotlivé typy výztuží viz Tabulka 30, 31 a 32.

Tabulka 30 Obsah nespalitelného podílu u skelné tkaniny s gramáží 220 g/m²

Epoxidové systémy	Obsah nespalitelného podílu [%]
285:285	48,75
574:492	49
574:512	49,7
582:502	49,82
582:512	51

Tabulka 31 Obsah nespalitelného podílu u skelné tkaniny s gramáží 160 g/m²

Epoxidové systémy	Obsah nespalitelného podílu [%]
285:285	47
574:492	49
574:512	50,05
582:502	49,5
582:512	49,5

Tabulka 32 Obsah nespalitelného podílu u skelné netkané rohože s gramáží 450 g/m²

Epoxidové systémy	Obsah nespalitelného podílu [%]
285:285	45,25
574:492	49
574:512	47,35
582:502	47,95
582:512	47

Výsledky, které se pohybují do 5 % nad očekávaným výsledkem jsou způsobeny kvalitou ruční laminace, tento problém je docela běžný, avšak je důležité podotknout, že výsledky obou měření jednoho vzorku byly vždy velmi podobné, tudíž jednotlivé desky byly laminovány se

stejnou chybou v celém objemu, vzhledem k tomu, že vzorky pro měření byly odebrány z různých částí desky.

4.4.2 Pevnost v tahu skelných laminátů

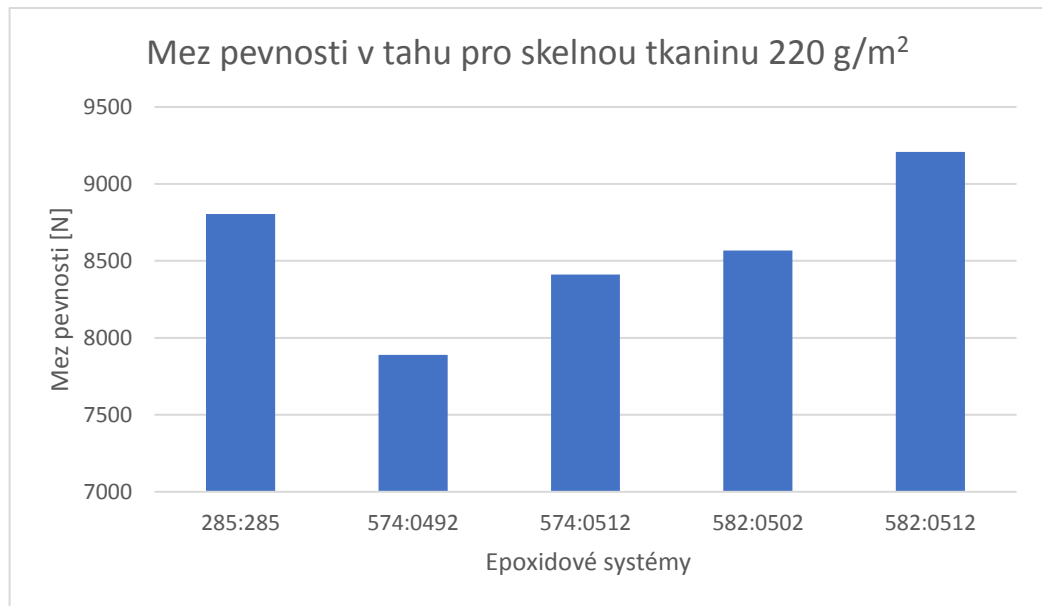
Zkouška pevnosti v tahu matric se provádí za účelem zjištění meze pevnosti, modulu pružnosti a jejich tažnosti. Z naměřených hodnot lze potom určit, který systém dosahuje podobných, či lepších hodnot v porovnáním se standardem.

Pevnost v tahu byla měřena na přístroji MTS-4/M s použitím čelistí na tah. Rychlost posuvu byla 5 mm/min. Byly měřeny všechny systémy o velikosti tělísek 150x10x4 mm ve tvaru „psí kosti“. Celkem bylo provedeno minimálně 7 měření pro každý vzorek. Výsledky pro jednotlivé tkaniny (rohož) viz Tabulka 33, 34 a 35. Porovnání meze pevnosti v tahu a tažnost skelné tkaniny 220 g/m² viz Graf 6 a 7, skelné tkaniny 160 g/m² viz Graf 8 a 9 a skelné rohože 450 g/m² viz Graf 10 a 11.

Tabulka 33 Výsledky měření meze pevnosti v tahu skelné tkaniny 220 g/m²

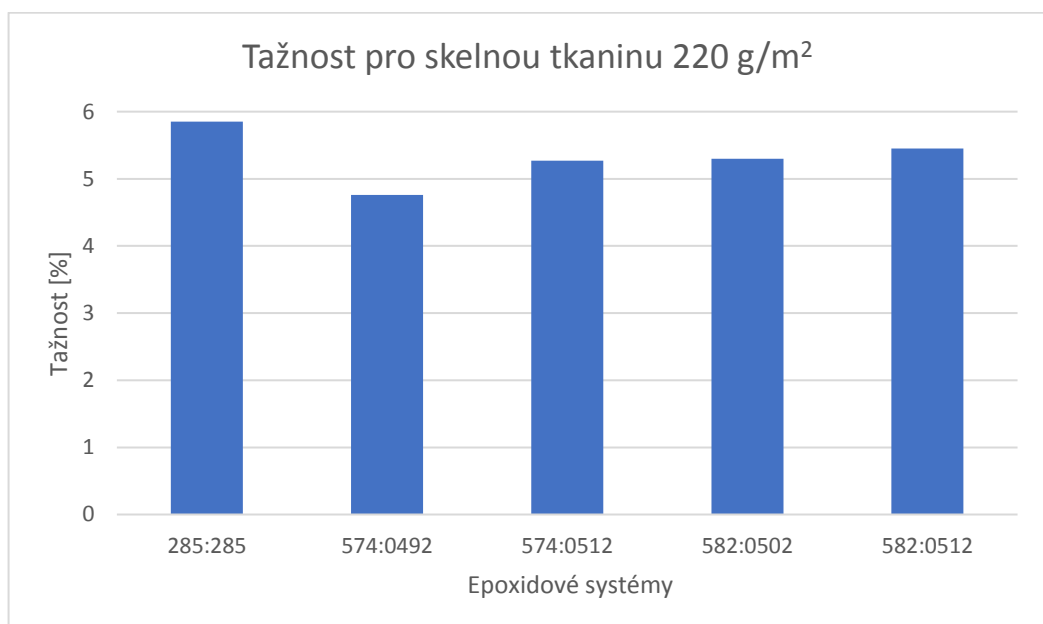
Matrice	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul [MPa]	Tažnost [%]
285:285	8804,68 ± 346,49	325,68 ± 15,56	10041,22 ± 1050,45	5,85 ± 0,24
574:0492	7889,98 ± 318,69	281,11 ± 12,40	10770,77 ± 930,92	4,76 ± 0,29
574:0512	8411,68 ± 529,64	304,06 ± 22,42	9563,48 ± 1014,56	5,27 ± 0,45
582:0502	8566,83 ± 380,93	325,72 ± 20,02	9661,43 ± 899,13	5,30 ± 0,32
582:0512	9207,69 ± 409,86	335,20 ± 21,49	11449,29 ± 1573,23	5,45 ± 0,24

Z tabulky 33 vyplývá, že modul pružnosti pro skelnou tkaninu 220 g/m² nabývá hodnot okolo 10 000 MPa a všechny systémy jsou tedy velmi podobné, nepatrně vyčnívá systém 582:0512 s hodnotou 11449,29 MPa.



Graf 6 Porovnání mezí pevnosti v tahu pro skelnou tkaninu 220 g/m²

Výsledek měření meze pevnosti v tahu pro skelnou tkaninu 220 g/m² pro standard je 8804,68 N, jediný systém, který tuto hodnotu překročil byl 582:0512 s hodnotou 9207,69 N.



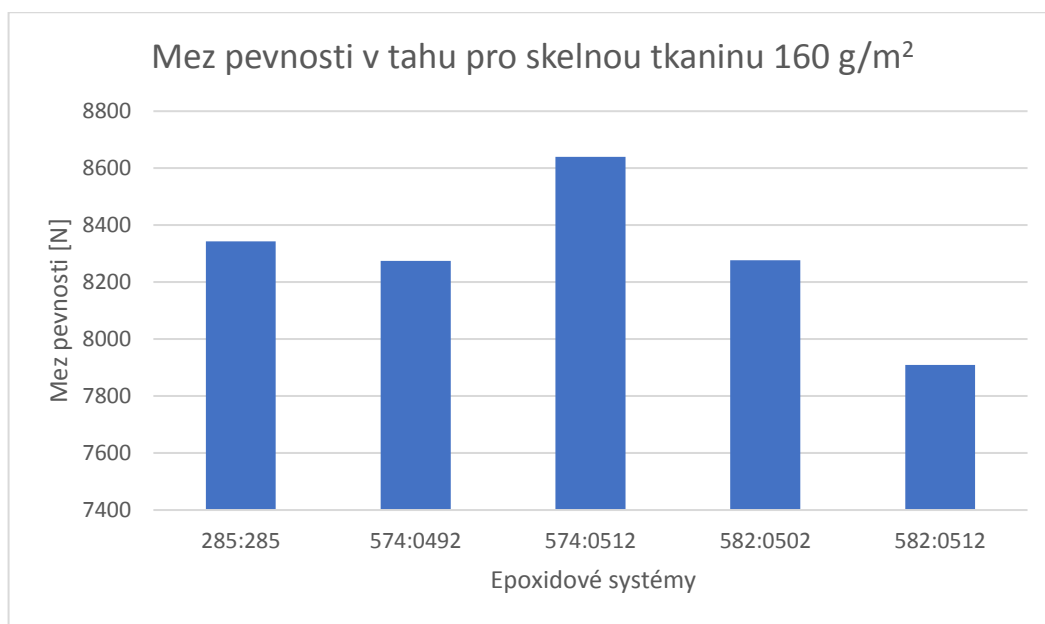
Graf 7 Porovnání tažnosti pro skelnou tkaninu 220 g/m²

Výsledek měření tažnosti pro skelnou tkaninu 220 g/m² pro standard je 5,85 % a nabývá nejvyšší hodnoty, ostatní systémy se však k tomuto výsledku velmi přibližují, a tak s přihlédnutím k odchýlkám jsou rozdíly v tažnosti malé.

Tabulka 34 Výsledky měření meze pevnosti v tahu skelné tkaniny 160 g/m²

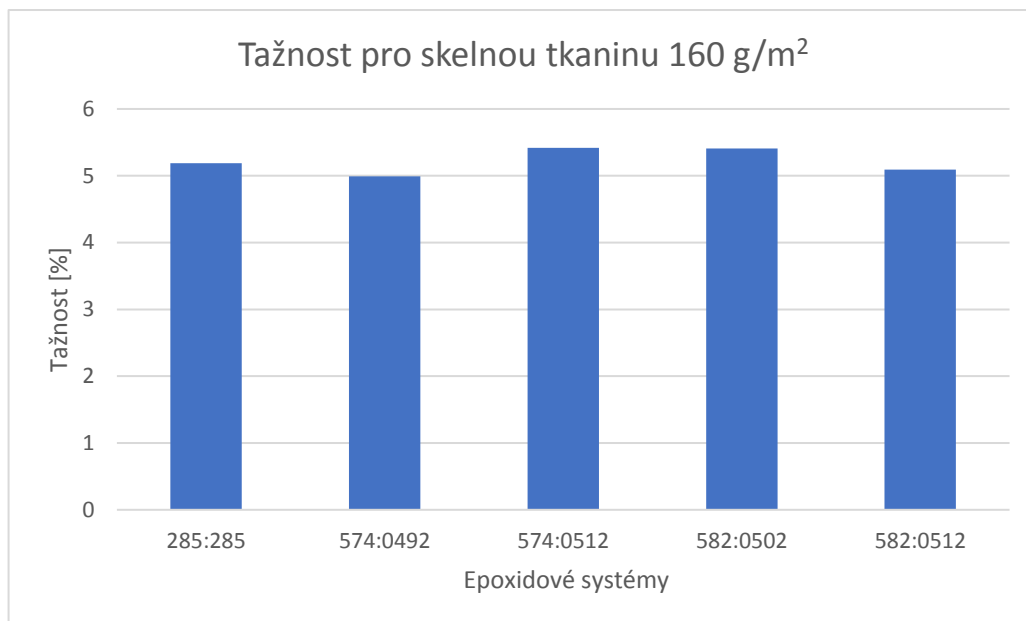
Matrice	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul [MPa]	Tažnost [%]
285:285	8343,30 ± 465,36	298,77 ± 14,46	13248,85 ± 2455,64	5,19 ± 0,25
574:0492	8274,94 ± 221,27	344,96 ± 6,44	12411,67 ± 794,93	4,99 ± 0,14
574:0512	8639,18 ± 387,02	310,72 ± 9,73	9575,94 ± 1033,71	5,42 ± 0,31
582:0502	8276,53 ± 295,07	305,13 ± 11,57	8361,46 ± 1490,79	5,41 ± 0,17
582:0512	7909,45 ± 277,95	297,54 ± 10,13	13847,05 ± 1951,27	5,09 ± 0,16

Z tabulky 34 vyplývá, že modul pružnosti pro skelnou tkaninu 160 g/m² je nejvyšší u systému 582:0512 s hodnotou 13 847,05 MPa, ke které se přibližuje i standard, naopak nejnižší hodnotu vykazuje systém 582:0502 s hodnotou 8361,46 MPa.



Graf 8 Porovnání mezí pevnosti v tahu pro skelnou tkaninu 160 g/m²

Výsledek měření meze pevnosti v tahu pro skelnou tkaninu 160 g/m² pro standard je 8343,3 N, jediný systém, který tuto hodnotu překročil byl 574:0512 s hodnotou 8638,18 N.



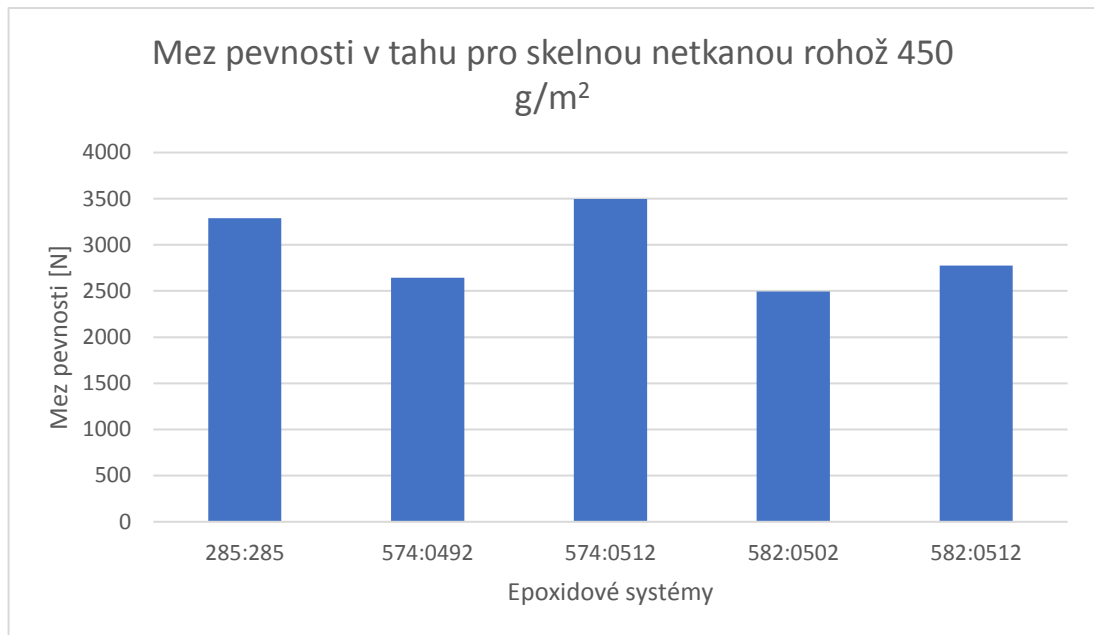
Graf 9 Porovnání mezi pevnosti v tahu pro skelnou tkaninu 160 g/m²

Výsledek měření tažnosti pro skelnou tkaninu 160 g/m² pro standard je 5,19 % a nenabývá nejvyšší hodnoty, překračují ho systémy 574:512 a 582:502, je však nutné podotknout, že celkové rozdíly mezi jednotlivými systémy jsou velmi malé.

Tabulka 35 Výsledky měření meze pevnosti v tahu skelné netkané rohože 450 g/m²

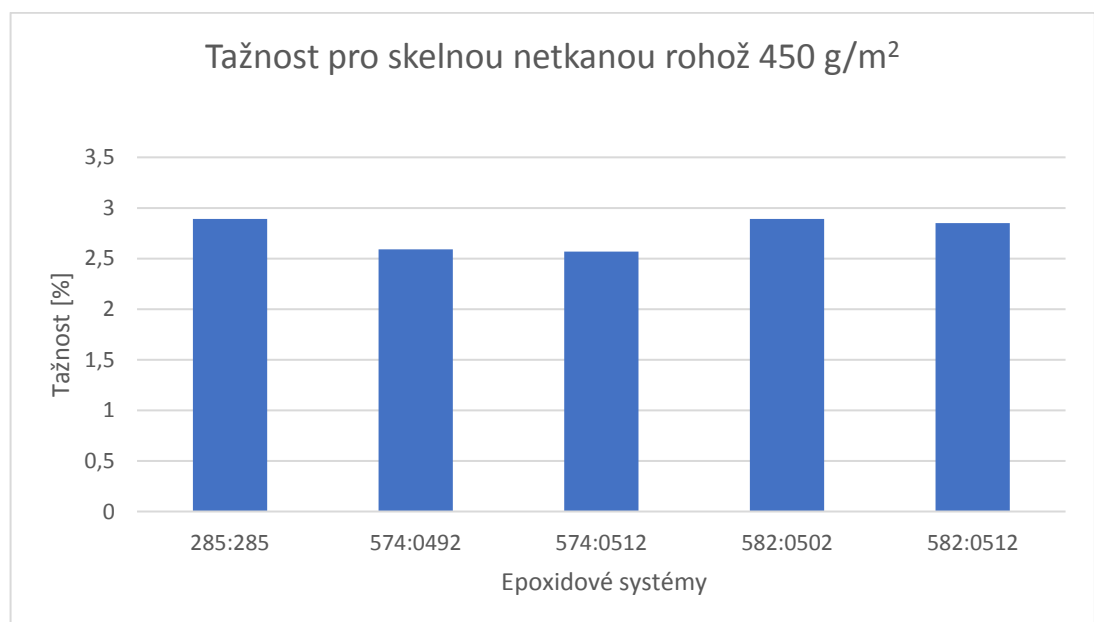
Matrice	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul [MPa]	Tažnost [%]
285:285	3289,5 ± 248,61	137,09 ± 9,86	8525,01 ± 2199,64	2,89 ± 1,26
574:0492	2643,03 ± 172,81	130,79 ± 11,05	8173,48 ± 671,43	2,59 ± 0,21
574:0512	3495,29 ± 267,36	155,16 ± 16,57	12371,20 ± 2968,20	2,57 ± 0,84
582:0502	2495,36 ± 227,89	129,98 ± 12,79	6851,13 ± 685,93	2,89 ± 0,50
582:0512	2776,13 ± 219,38	144,48 ± 10,37	8072,69 ± 554,88	2,85 ± 0,30

Z tabulky 35 vyplývá, že modul pružnosti pro skelnou netkanou rohož 450 g/m² je nejvyšší u systému 574:0512 s hodnotou 12371,20 MPa, naopak nejnižší je systém 582:0502 s hodnotou 6851,13 MPa.



Graf 10 Porovnání mezí pevnosti v tahu skelné netkané rohože 450 g/m²

Výsledek měření meze pevnosti v tahu pro skelnou netkanou rohož 450 g/m² pro standard je 3289,5 N, jediný systém, který tuto hodnotu překročil byl 574:0512 s hodnotou 3495,29 N, ostatní systémy nabývají hodnot kolem 2500 N.



Graf 11 Porovnání tažnosti skelné netkané rohože 450 g/m²

Výsledek měření tažnosti pro skelnou netkanou rohož 450 g/m² pro standard je 2,89 % a nabývá nejvyšší hodnoty spolu se systémem 582:502, který má však menší odchylku, důležité je ovšem podotknout, že celkové rozdíly mezi jednotlivými systémy jsou velmi malé.

U celkového hodnocení systémů je třeba zmínit, že systém 582:0512 u skelné tkaniny 220 a 160 g/m² nevycházel dobře, u první zmíněné tkaniny byl vyšší a u druhé zase výrazně nižší. Je to způsobeno tím, že systém má krátkou dobu želatinace (cca 35 minut) a tudíž v případě ručního laminování 13 vrstev u skelné tkaniny 160 g/m² je to krátká doba, tedy tento systém není zcela vhodný pro tuto metodu, především v případě, kdy je výrobek složitějších tvarů (záhyby, velká plocha, velký počet vrstev). Z výsledků nespalitelného podílu plyne, že prvně zmíněná tkanina byla oproti druhé zmíněné více nedosycená, což mohlo mít také vliv na tento výsledek. Co se týká porovnání výztuží, tak nejhůř vychází mez pevnosti v tahu u skelné netkané rohože, což se dalo předpokládat, naopak hodnoty skelných tkanin jsou si blízké, ale skelná tkanina 220 g/m² vychází o trochu lépe (hodnoty jsou vyšší). Tato podobnost je dána počtem vrstev, jelikož skelná tkanina 160 g/m² má o 3 vrstvy více než druhá.

4.4.3 Pevnost v ohybu skelných laminátů

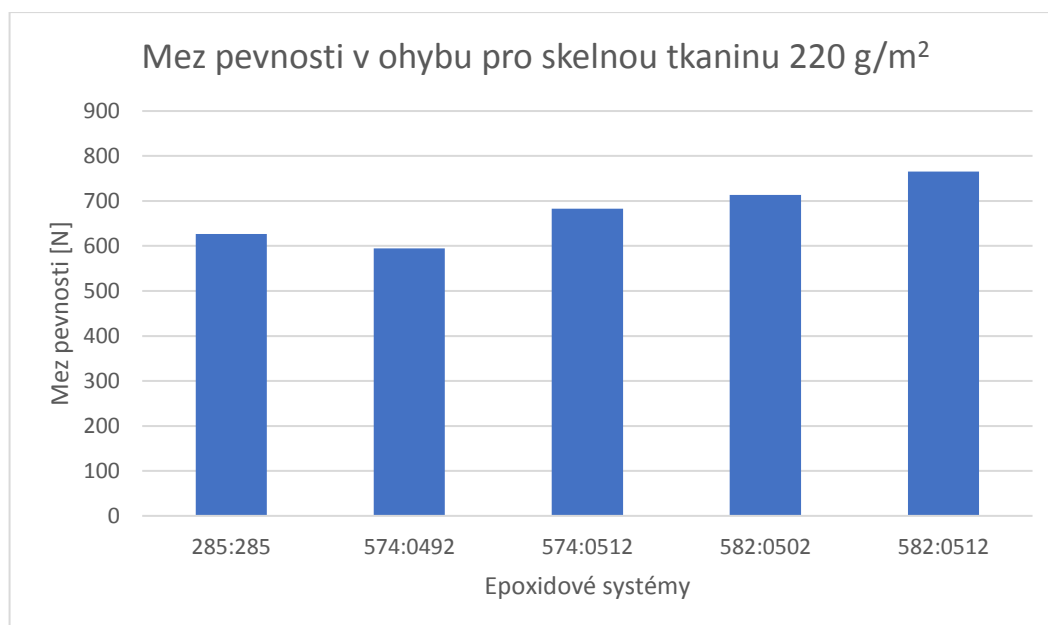
Zkouška pevnosti v ohybu skelných laminátů se provádí za účelem zjištění meze pevnosti v ohybu, modulu pružnosti a průhybu při maximu. Z naměřených hodnot lze potom určit, který systém dosahuje podobných, či lepších hodnot v porovnání se standardem.

Pevnost v ohybu byla měřena na přístroji MTS-4/M s použitím tříbodového ohybového zařízení. Rychlost posuvu byla 1 mm/min. Byly měřeny vzorky o velikosti 80x10x2-3 mm a celkem bylo provedeno minimálně 7 měření pro každý vzorek. Výsledky pro jednotlivé tkaniny (rohož) viz Tabulka 36, 37 a 38. Porovnání meze pevnosti v ohybu skelné tkaniny 220 g/m² viz Graf 12, skelné tkaniny 160 g/m² viz Graf 13 a skelné rohože 450 g/m² viz Graf 14.

Tabulka 36 Výsledky měření meze pevnosti v ohybu skelné tkaniny 220 g/m²

Matrice	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	Průhyb při maximu [%]
285:285	626,5 ± 46,8	437,61 ± 25,39	17002,75 ± 1180,37	3,52 ± 0,43
574:0492	594,3 ± 38,7	368,8 ± 26,31	14749,77 ± 1227,27	3,41 ± 0,32
574:0512	683,1 ± 38,7	430,33 ± 21,81	15116,5 ± 596,97	3,68 ± 0,22
582:0502	713,2 ± 33,8	498,96 ± 36,27	17172,58 ± 937,4	3,48 ± 0,29
582:0512	765,7 ± 58,8	492,88 ± 17,70	16192,68 ± 788,16	3,50 ± 0,23

Z tabulky 36 vyplývá, že modul pružnosti pro skelnou tkaninu 220 g/m² je nejvyšší u systému 582:0512 (17172,58 MPa) následovaný těsně standardem. Nejnižší hodnotu nabývá systém 574:0492 s 14749,77 MPa. Průhyby při maximu jsou u všech systémů velmi podobné a vykazují hodnoty kolem 3,5 %.



Graf 12 Porovnání mezi pevnosti v ohybu pro skelnou tkaninu 220 g/m²

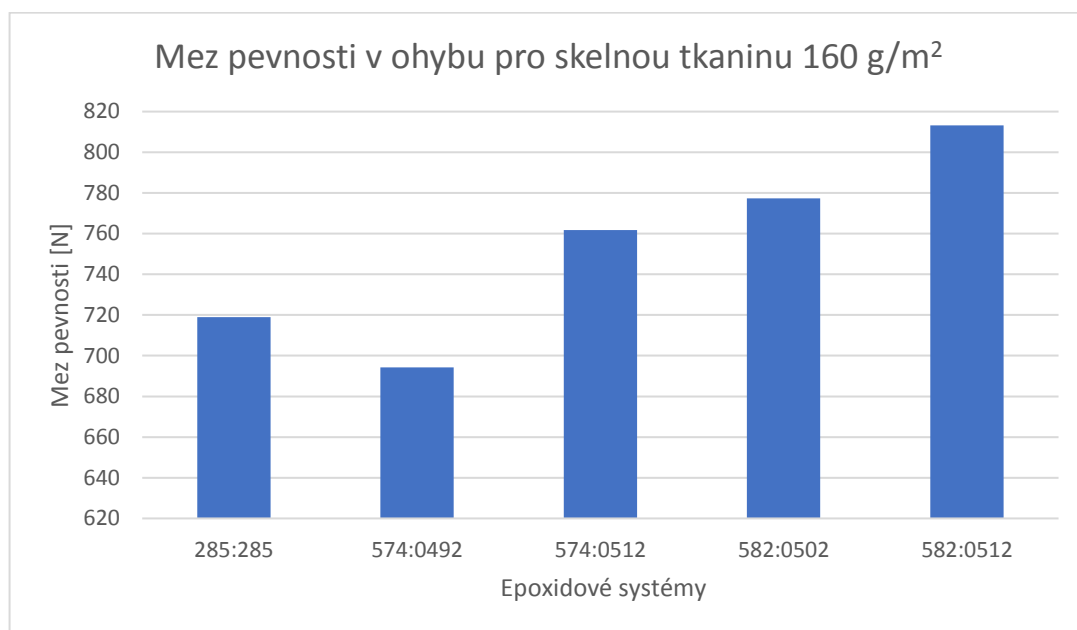
Výsledek měření meze pevnosti v ohybu pro skelnou tkaninu 220 g/m² pro standard je 626,5 N, systémy, které tuto hodnotu překročily byly 574:512, 582:502 a 582:512, avšak je nutné podotknout, že všechny tyto systémy se pohybovaly kolem 700 N.

Tabulka 37 Výsledky měření meze pevnosti v ohybu skelné tkaniny 160 g/m²

Matrice	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	Průhyb při maximu [%]
285:285	718,9 ± 42,8	498,75 ± 29,92	16569,4 ± 1510,25	3,42 ± 0,16
574:0492	694,2 ± 61,4	501,85 ± 18,29	16718,01 ± 991,36	3,40 ± 0,11
574:0512	761,7 ± 51,1	508,98 ± 34,63	15755,33 ± 605,51	3,60 ± 0,08
582:0502	777,3 ± 26,5	531,79 ± 16,11	16422,3 ± 567,40	3,60 ± 0,11
582:0512	813,3 ± 29,2	533,45 ± 33,80	15845,17 ± 1450,30	3,61 ± 0,16

Z tabulky 37 vyplývá, že modul pružnosti pro skelnou tkaninu 160 g/m² je nejvyšší u systému 574:0492 (16718,01 MPa) následovaný těsně standardem. Ovšem všechny systémy se pohybují

s hodnotami kolem 16000 MPa. Průhyby při maximum jsou u všech systémů velmi podobné a vykazují hodnoty kolem 3,5 %.



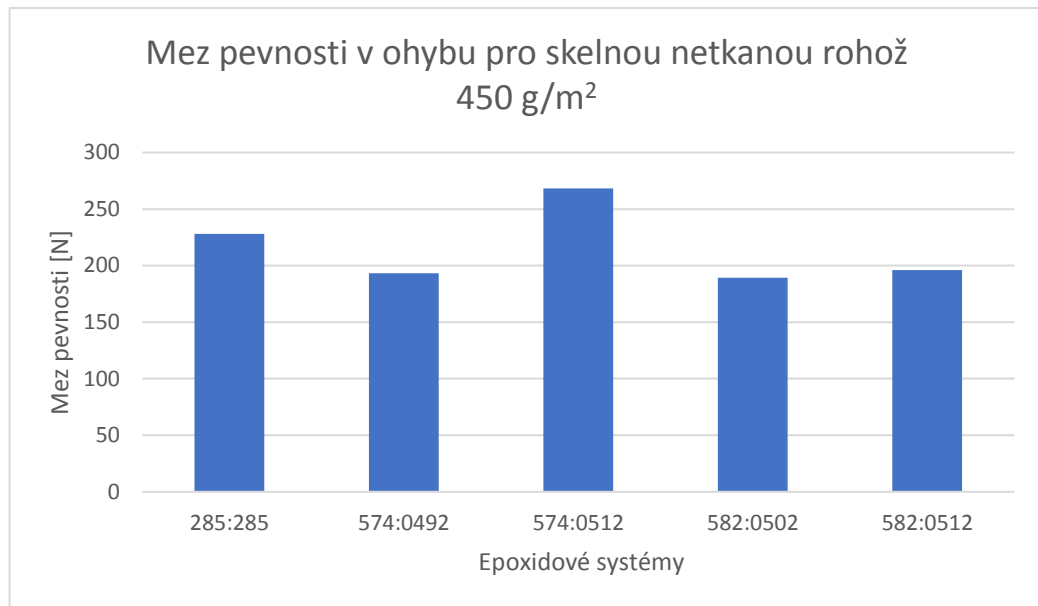
Graf 13 Porovnání mezí pevnosti v ohybu pro skelnou tkaninu 160 g/m²

Výsledek měření meze pevnosti v ohybu pro skelnou tkaninu 160 g/m² pro standard je 718,9 N, systémy, které tuto hodnotu překročily byly 574:512, 582:502 a 582:512.

Tabulka 38 Výsledky měření meze pevnosti v ohybu skelné netkané rohože 450 g/m²

Matrice	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	Průhyb při maximum [%]
285:285	228,1 ± 11,3	218,22 ± 23,65	9361,54 ± 629,94	3,31 ± 0,24
574:0492	193,3 ± 21,1	239,95 ± 17,22	9648,05 ± 432,25	3,13 ± 0,30
574:0512	268,4 ± 26,6	221,32 ± 28,85	9395,82 ± 975,53	2,72 ± 0,26
582:0502	189,2 ± 21,3	201,17 ± 25,99	9129,66 ± 828,66	3,05 ± 0,51
582:0512	196,0 ± 16,8	214,97 ± 23,07	8594,3 ± 704,61	3,08 ± 0,25

Z tabulky 38 vyplývá, že modul pružnosti pro skelnou netkanou rohož 450 g/m² je nejvyšší u systému 574:0492 (9648,05 MPa). Nejnižší hodnotu nabývá systém 582:0512 s 8594,3 MPa. Průhyby při maximum jsou u všech systémů velmi podobné a vykazují hodnoty kolem 3 %.



Graf 14 Porovnání mezi pevnosti v ohybu skelné netkané rohože 450 g/m²

Výsledek měření meze pevnosti v ohybu pro skelnou netkanou rohož 450 g/m² pro standard je 228,1 N, jediný systém, který tuto hodnotu překročil byl 574:512 s hodnotou 268,4 N. Hodnoty zbylých systémů se pohybují těsně pod hranicí 200 N.

Z celkového hodnocení vyplývá, že u skelných tkanin je stejný nárůst/pokles hodnot u měřených systémů, u netkané rohože je tomu jinak, ale to může být způsobeno tím, že netkaná rohož není vhodná k ruční laminaci, vzhledem k tomu, že krátká vlákna mají v průběhu laminace tendenci nachytávat se na váleček, a tudíž celá laminace je tím komplikována. Skelné tkaniny mají téměř shodné hodnoty meze pevnosti v ohybu, ale o něco málo větší jsou hodnoty u skelné tkaniny 160 g/m², což je způsobeno větším počtem vrstev.

4.4.4 Rázová houževnatost skelných laminátů

Rázová houževnatost byla provedena na vzorcích skelného laminátu o velikosti 80x10x4 mm pomocí Charpyho kladiva. Zkouška probíhala pod zatížením 4 J. Výsledky pro jednotlivé vzorky viz Tabulka 39, 40 a 41.

Tabulka 39 Rázová houževnatost skelné tkaniny 220 g/m²

Epoxidové systémy	Práce [J]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
285:285	3,55 ± 0,16	131,42 ± 9,72
574:0492	3,14 ± 0,29	110,46 ± 6,18
574:0512	3,30 ± 0,24	125,24 ± 9,27
582:0502	3,79 ± 0,12	144,09 ± 4,85
582:0512	3,62 ± 0,16	128,69 ± 5,30

Tabulka 40 Rázová houževnatost skelné tkaniny 160 g/m²

Epoxidové systémy	Práce [J]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
285:285	3,41 ± 0,19	126,78 ± 6,43
574:0492	3,56 ± 0,11	131,91 ± 3,51
574:0512	3,71 ± 0,11	136,11 ± 5,47
582:0502	3,46 ± 0,11	125,77 ± 5,32
582:0512	3,54 ± 0,09	131,13 ± 7,54

Tabulka 41 Rázová houževnatost skelné netkané rohože 450 g/m²

Epoxidové systémy	Práce [J]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
285:285	1,54 ± 0,09	70,68 ± 5,13
574:0492	1,04 ± 0,07	52,67 ± 1,57
574:0512	1,61 ± 0,10	63,34 ± 3,16
582:0502	1,27 ± 0,07	54,04 ± 3,04
582:0512	1,32 ± 0,08	62,94 ± 3,67

Rázová houževnatost skelné tkaniny 220 g/m² pro standard je 131,42 kJ/m², jediný systém, který tuto hodnotu překročil, byl 582:0502, naopak nejnižší hodnoty nabývá systém 574:0492. Rázová houževnatost skelné tkaniny 160 g/m² pro standard je 126,78 kJ/m², systémy, které tuto hodnotu překročily byly všechny až na 582:0502.

Rázová houževnatost skelné netkané rohože 450 g/m² pro standard je 70,68 kJ/m² žádný systém tuto hodnotu nepřekročil.

Je však nutné podotknout, že rozdíly v rámci měření jednotlivých skelných tkanin nejsou vysoké. Při vzájemném porovnání tkanin vychází nejlépe skelná tkanina 220 g/m², následovaná skelnou tkaninou 160 g/m² a nejhorší výsledky vykazuje netkaná rohož 450 g/m².

4.4.5 Tvrdost dle Vickerse

Tvrdost byla měřena u laminátových vzorků dle Vickerse se zatížením 20 kgf. Bylo provedeno minimálně 7 měření, z nichž byl zaznamenán průměrný výsledek. Hodnoty měření pro jednotlivé systémy viz Tabulka 42, 43 a 44.

Tabulka 42 Tvrdost dle Vickerse pro skelnou tkaninu 220 g/m²

Epoxidové systémy	Tvrdost [HV 20]
285:285	27,21 ± 1,68
574:492	27,42 ± 0,98
574:512	27,33 ± 1,28
582:502	29,58 ± 1,79
582:512	30,18 ± 1,07

Naměřená tvrdost dle Vickerse u skelné tkaniny 220 g/m² byla pro standard 27,21 a nabývala nejnižší hodnoty, nejvyšší hodnoty nabýval systém 582:512, celkově se ale hodnoty jednotlivých systémů pohybovaly okolo 28.

Tabulka 43 Tvrdost dle Vickerse pro skelnou tkaninu 160 g/m²

Epoxidové systémy	Tvrdost [HV 20]
285:285	30,24 ± 0,97
574:492	31,68 ± 1,49
574:512	31,65 ± 0,73
582:502	29,30 ± 0,64
582:512	31,67 ± 0,93

Naměřená tvrdost dle Vickerse u skelné tkaniny 160 g/m² byla pro standard 30,24 a nabývala po systému 582:502 nejnižší hodnoty, nejvyšší hodnoty nabýval systém 574:492, s ohledem na odchylku se do systémů s nejvyšší hodnotou tvrdosti dle Vickerse mohou řadit i systémy 574:512 a 582:512, protože ve výsledku se všechny hodnoty pohybovaly kolem 30.

Tabulka 44 Tvrdost dle Vickerse pro skelnou netkanou rohož 450 g/m²

Epoxidové systémy	Tvrdost [HV 20]
285:285	28,02 ± 1,03
574:492	24,76 ± 2,36
574:512	29,58 ± 1,49
582:502	23,46 ± 1,96
582:512	25,12 ± 1,80

Naměřená tvrdost dle Vickerse u skelné netkané rohože 450 g/m² byla pro standard 28,02 a nabývala po systému 574:512 nejvyšší hodnoty. Nejnižší naměřená tvrdost byla u systému 582:502 s hodnotou 23,46.

Z celkového hodnocení vyplývá, že největší tvrdost dle Vickerse mají systémy se skelnou tkaninou 160 g/m², těsně následovaný skelnou tkaninou 220 g/m², nejnižší tvrdost vykazuje skelná netkaná rohož, což se předpokládalo.

5 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byla rešerše na téma vybraných používaných kompozitních materiálů převážně v leteckém modelářství a letectví. První část byla věnována představení kompozitu, popisu vybraným matricím (jejich modifikaci) a výztužím, jejich použití a vlastnostem. V druhé části byly popsány některé možné způsoby laminace a použití především v letectví a modelářství.

V experimentální části byly testovány jednotlivé složky (epoxidové pryskyřice a tvrdidla), dále celé systémy těchto složek a na základě jejich testování byly vybrány 4 systémy a zvolený standard, ze kterých bylo celkem ručně nalaminováno 15 desek (5 systémů se 3 různými výztužemi). U nich byly dále měřeny mechanické vlastnosti. Na základě výsledků bylo vyhodnoceno, zda některý ze systémů může plně nahradit standard, který se v modelářství a letectví běžně používá.

Z výsledků vyplývá, že celkově nejhorší výsledky vykazuje systém 574:0492. O ostatních porovnávaných třech systémech nelze jednoznačně říci, že je některý lepší než standard, ale ve zkoušce pevnosti v ohybu tomu tak bylo. Je však nutné říci, že pokud byl standard horší, tak s ohledem na odchylky byly rozdíly mezi systémy malé. Konkurence schopný systém, v některých případech i lepší byl systém 574:0512. S ohledem na nižší cenu je tento systém výhodnější. Zbylé dva systémy 582:0502 a 582:0512 jsou mezi sebou relativně srovnatelné a z porovnávaných systémů je lze zařadit společně na 2.-3. místo.

Při porovnání jednotlivých výztuží vykazuje nejhorší vlastnosti vždy netkaná rohož 450 g/m², což se i předpokládalo. Při porovnání skelných tkanin 220 a 160 g/m² jsou výsledky jednotlivých měření mnohdy velmi podobné, což je způsobeno větším počtem vrstev (13) u skelné tkaniny s menší gramáží, oproti druhé s 10 vrstvami. Celkově vzato je ale skelná tkanina 220 g/m² o něco málo lepší v tahu, rázové houževnatosti a když se vezme v potaz odchylka, tak i v tvrdosti, horší je jen v pevnosti v ohybu.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SOUKUPOVÁ, Nikola, 2017. *Studium tahových vlastností vybraných kompozitních materiálů pro letectví s rozdílným typem výztuže*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [2] BAREŠ, Richard, 1988. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
- [3] REINHART, Theodore J., 1987. *Engineered materials handbook: COMPOSITES*. 1. Ohio: ASM INTERNATIONAL Handbook Committee. ISBN 0-87170-279-7.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W., 2009. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] BIRON, Michel., 2018. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites (3rd Edition) - 6.2 Reminder of Some Basic Principles*. Elsevier. [online]. [cit. 2019-04-13] Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011Q25N2/thermoplastics-thermoplastic/reminder-some-basic-principles>
- [6] *Engineering Design Handbook - Dielectric Embedding of Electrical or Electronic Components: (DARCOM-P 706-315) - 3.1.1 Electrical Properties of Epoxies*. U.S. Army Materiel Command. [online]. [cit. 2019-04-13] Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00AC94W1/engineering-design-handbook-2/general-characteristics-electrical>
- [7] WYPYCH, George, 2018. *Handbook of Adhesion Promoters - 6.1 Selection of Co-Monomers*. ChemTec Publishing. [online]. [cit. 2019-04-14] Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011GHLS4/handbook-adhesion-promoters/selection-co-monomers>
- [8] LIDARŤÍK, Miloslav, 1983. *Epoxidové pryskyřice*. 3., přeprac. a rozš. vyd. Praha: SNTL., Makromolekulární látky.
- [9] *Glorytapes* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.glorytapes.com/wp-content/uploads/2017/07/fiberglass-yarn-300x263.jpg>
- [10] Skelná rohož 30 g/m², *Sea-line* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.sea-line.cz/skelne-a-uhlikove-tkaniny/95-skelna-rohoz-ec-industryglass-praskova-150-gm2.html>
- [11] Kepr, *Carbon Parts* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.carbon-parts.cz/img/Karbon-Kevlar%20kepr.jpeg>
- [12] Knitted Bolt-Hole Drop-Warp Ladder Tape on right (woven tape on left), *Extreme Heat Protection* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z:

<http://www.extremeheatprotection.com/images/300%20ladder%20tape%20%knit%20vs%20woven%20fiberglass.jpg>

[13] DAŘOUREK, Karel, 2007. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-279-1.

[14] Kevlar Fiber Sheet, *Indiamart* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/kevlar-fibre-sheet-12811717991.html>

[15] Hot Sale Boron Fiber Roving, *Alibaba* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-Sale-Boron-Fiber-Roving_1912110408.html

[16] Type of carbon fiber: Type of Carbon Fiber Products and their Special Features. *Tha Japan Carbon Fiber Manufactures Association* [online]. [cit. 2019-03-17]. 2002-2017. Dostupné z: <https://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/type.html>

[17] TAJ, Saira, Munawar Ali MUNAWAR a Shafiullah KHAN, 2007. *Natural fiber reinforced polymer composites* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Munawar_Munawar5/publication/228636811_Natural_fiber-reinforced_polymer_composites/links/544e8ced0cf29473161be3d9/Natural-fiber-reinforced-polymer-composites.pdf

[18] WOLF, Rory A., 2010. *Plastic Surface Modification - Surface Treatment, Decoration, and Adhesion - 4.1 Bare Roll: Features and Application Benefits*. Hanser Publishers. [online]. [cit. 2019-04-15] Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0084T3LL/plastic-surface-modification/bare-roll-features-application>

[19] ŠIRJOVOVÁ, Veronika, 2017. *Mechanická odezva skleněnými vlákny vyztuženého polymerního kompozitu* [online] [cit. 2019-04-16]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=146474

[20] *Photobucket* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://photobucket.com/gallery/user/ebayPCI/media/bWVkaWFJZDoxNzU1MTc5Mg==/?ref=>

[21] *Product Sensor Pressure* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://kitchendecor.club/files/product-sensor-pressure.html>

[22] ŽÁČEK, Štěpán, 2012. *Experimentální studium technologických parametrů při vakuové infuzní technologii*. Zlín. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

[23] *GDP KORAL COMPOSITES* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/UserFiles/Image/Telo/pultruze.gif>

- [24] LUX Velurový váleček 15 cm, In: *OBI* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.ob.cz/valecky-na-barvu/lux-velurovy-valecek-15-cm-/p/1487461>
- [25] ŠAFARÍK, Ondřej, 2016. *Uplatnění vakuové infuze pro výrobu hybridních kompozitních systémů*. Zlín. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [26] GUDMUNDSSON, 2014. *General Aviation Aircraft Design - Applied Methods and Procedures* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGAADAMP8/general-aviation-aircraft/general-aviation-aircraft>
- [27] M. ALY, Nermin, 2017. *A review on utilization of textile composites in transportation towards sustainability* [online]. [cit. 2019-04-19]. DOI: 10.1088/1757-899X/254/4/042002. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320951033_A_review_on_utilization_of_textile_composites_in_transportation_towards_sustainability
- [28] ATEC 321 FAETA NG, *ATEC v.o.s.* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.atecaircraft.eu/letadla/atec-321-faeta-ng>
- [29] Yak 54 V3 Freestyle, *MODEL POWER* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.model-power.cz/designs.html#Design>
- [30] Technický list: laminační pryskyřice L 285; tužidla 285, 286, 287, 2016. *Docplayer* [online]. [cit. 2019-03-7]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/14122489-Technicky-list-l-a-m-i-n-a-c-n-i-p-r-y-s-k-y-r-i-c-e-l-285-t-u-z-i-d-l-a-285-286-287-navod-k-pouziti-technicke-listy.html>
- [31] SPOLCHEMIE, Technický list: CHS-EPODUR 574-0482, 0492, 0502, 0512, 2015
- [32] SPOLCHEMIE, Technický list: CHS-EPODUR 582-0482, 0492, 0502, 0512, 0590, 2015
- [33] SILIKONOVÝ OLEJ, *NOVATO* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.novato.cz/produkt/201/silikonovy-olej>
- [34] HAVEL, Milan, Jindřich PETRLÍK a Petr VÁLEK, Toluen. *ARNIKA* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://arnika.org/toluen>
- [35] Skelná tkanina 160g/m 2 m šíře 1 m, 2019. *JINO modelářské potřeby* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: https://www.jino.cz/skelna-tkanina-160g/m-2-m-sire-1-m_2163
- [36] Skelná rohož 450g/m2 prášková prodej na kg, 2019. *HAVEL-composites* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkt/skelna-rohoz-450g-m2-praskova-prodej-na-kg-787-5025>

- [37] Chopped Strand Mat: M123, *OWENS CORNING* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: http://www.ocvreinforcements.com/pdf/products/7710010216_B_ChoppedStrandMats_M123_emea_06_2008_Rev4.pdf
- [38] MILIČ, Richard a Miroslav VEČEŘA., 1991 *Laboratorní příručka pro technologii polymerů*. Pardubice: Vysoká škola chemicko-technologická.
- [39] Infračervená spektroskopie, *VŠCHT* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm>
- [40] Mechanické vlastnosti polymerů – dynamické rázové namáhání, 2019. *Publi* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/11.html>