

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

Pavel Miklica

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Vlastnosti kompozitních materiálů s proměnnou maticí a výztuží

Pavel Miklica

Bakalářská práce

2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel Miklica**
Osobní číslo: **C15152**
Studijní program: **B2829 Anorganické a polymerní materiály**
Studijní obor: **Polymerní materiály a kompozity**
Název tématu: **Vlastnosti kompozitních materiálů s proměnnou maticí a výztuží**
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. Vypracujte literární rešerši na téma kompozitní materiály s různými typy matic a výztuží.
2. V teoretické části se dále zaměřte na stručný přehled problematiky technologie přípravy a zpracování kompozitních materiálů.
3. Připravte jednotlivé vzorky kompozitních materiálů na bázi různých typů epoxidových pryskyřic s rozdílnými výztužemi.
4. Studujte vliv jednotlivých typů matic a výztuží v připravených kompozitních materiálech na fyzikálně-mechanické vlastnosti.
5. Srovnajte a diskutujte zjištěné výsledky fyzikálně-mechanických vlastností v závislosti na typu matrice a výztuže.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Luboš Prokúpek, Dr.

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek


Datum zadání bakalářské práce: **18. prosince 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **4. července 2018**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2018

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen 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.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne

Pavel Miklica

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, kterým byl Ing. Luboš Prokůpek Dr. za jeho pomoc s prací a také cenné rady. Dále bych pak rád poděkoval doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za umožnění výroby vzorku na Univerzitě Tomáši Bati ve Zlíně. Velké díky patří také společnosti Spolchemie a.s. za poskytnutí pryskyřic a tvrdidel a společnosti Synpo a.s. za nařezání vzorků. V neposlední řadě musím poděkovat mé rodině, která mě při studiu podporovala.

ANOTACE

Bakalářská práce se v teoretické části zaměřuje na definici kompozitního materiálu, dále pak na dělení kompozitů dle matic a výztuží, se zaměřením na výztuže skelného typu a epoxidové matrice. Následuje krátký popis základních technologií pro výrobu kompozitů, kde je podrobněji probrána vakuová infuze. V experimentální části je kladen důraz na výrobu vzorků pomocí vakuové infuze a zkoušky jejich mechanických vlastností.

KLÍČOVÁ SLOVA

epoxidové pryskyřice, kompozitní materiály, mechanické vlastnosti, vakuová infúze

TITLE

Properties of composite materials with variable matrix and reinforcement

ANNOTATION

This bachelor thesis in theoretical part focuses on the definition of composite material, then on the division of composites based on their matrices and reinforcement with a focus on the glass type of reinforcement and epoxy matrices. The following is a short description of basic technologies for the production of composites, where the vacuum infusion is further discussed. The experimental part is focused on the production of samples by using vacuum infusion and on testing their mechanical properties

KEYWORDS

composites, epoxy resins, mechanical properties, vacuum infusion

OBSAH

0	Úvod.....	14
1	Teoretická část	15
1.1	Kompozitní materiály	15
1.1.1	Matrice	16
1.1.1.1	Termoplasty	17
1.1.1.1.1	Polyolefiny	18
1.1.1.1.2	Polyetheretherketon.....	19
1.1.1.1.3	Polyfenylensulfid (polythio-1,4-fenylene).....	20
1.1.1.1.4	Polybutylentereftalát	21
1.1.1.1.5	Polykarbonáty	22
1.1.1.2	Reaktoplasty	23
1.1.1.2.1	Epoxidové pryskyřice.....	23
1.1.1.2.2	Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)	29
1.1.1.2.3	Rezoly	31
1.1.2	Výztuže	33
1.1.2.1	Vláknové výztuže	34
1.1.2.1.1	Skelná vlákna	34
1.1.2.1.2	Uhlíková a grafitová vlákna	37
1.1.2.1.3	Aramidová vlákna	38
1.1.2.2	Částicové výztuže	40
1.1.2.2.1	Anorganická plniva	40
1.2	Sklolamináty	41
1.3	Technologie výroby laminátů	41
1.3.1	Ruční kladení	42
1.3.2	Lisování	42
1.3.3	Vakuová infuze	43

2	Experimentální část.....	45
2.1	Charakterizace materiálů	45
2.2	Zařízení pro vakuovou infúzi.....	49
2.3	Příprava vzorků.....	50
2.4	Metodika měření	55
3	Výsledky a diskuze	61
3.1	Stanovení vytvrzovací charakteristiky.....	61
3.2	Stanovení obsahu nespalitelných složek.....	62
3.3	Rázová houževnatost metodou Charpy.....	62
3.4	Ohybová zkouška.....	64
3.5	Tahová zkouška	66
3.6	Tvrдость dle Brinella	68
4	Závěr	70
5	Citovaná literatura.....	71
6	Přílohy.....	76

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A ROVNIC

Obrázek 1: Vzorec polyethylenu (vlevo) a polypropylenu (vpravo).....	18
Obrázek 2: Schématické znázornění stereoregulární polyinsertce	19
Obrázek 3: Syntéza polyetheretherketonu	19
Obrázek 4: Syntéza polyfenylsulfidu	20
Obrázek 5: Syntéza polybutylentereftalátu	21
Obrázek 6: Syntéza polykarbonátu z Bisfenolu A a fosgenu	22
Obrázek 7: Syntéza epoxidové pryskyřice.....	24
Obrázek 8: Glycidyllová skupina.....	24
Obrázek 9: Epoxidová skupina	24
Obrázek 10: Vytvrzování epoxidu za pomoci polyaminů	25
Obrázek 11: Tvorba aduktu	26
Obrázek 12: Methyl-Nadic anhydrid	27
Obrázek 13: Benzyldimethylamin	27
Obrázek 14: Vytvrzování epoxidů anhydridem.....	28
Obrázek 15: Syntéza nenasycené polyesterové pryskyřice	29
Obrázek 16: Vytvrzování nenasycené polyesterové pryskyřice	30
Obrázek 17: Dibenzoylperoxid.....	30
Obrázek 18: Syntéza rezolů	31
Obrázek 19: Struktura rezit tvrzeného kyselinami	32
Obrázek 20: Typy vazeb u tkanin	36
Obrázek 21: Oxidace PAN	37
Obrázek 22: Část lodi vyráběná metodou SCRIMP	44
Obrázek 23: Separační vosk	46
Obrázek 24: Netkaná rohož	46
Obrázek 25: Tkaná textilie.....	47
Obrázek 26: Nylonová odtrhová tkanina	47
Obrázek 27: Rozvodová tkanina.....	47
Obrázek 28: Separační folie.....	48
Obrázek 29: Vakuovací folie	48
Obrázek 30: Těsnící páska AT-200Y	48
Obrázek 31: Vakuová pumpa	49
Obrázek 32: Vakuový rezervoár RB 451.....	49

Obrázek 33: Skleněný základ formy.....	50
Obrázek 34: Založení tkaniny do formy	51
Obrázek 35: Skládání formy – separační folie.....	51
Obrázek 36: Skládání formy – odtrhová tkanina	51
Obrázek 37: Skládání formy – rozvodová tkanina s vtoky a vstupem vakua.....	51
Obrázek 38: Skládání formy – příprava vtoku (1.část).....	52
Obrázek 39: Skládání formy – příprava vtoku (2.část).....	52
Obrázek 40: Skládání formy – lepení rohu se vstupem	52
Obrázek 41: Skládání formy – tvoření „výstupků“	52
Obrázek 42: Skládání formy – lepení vakuovací folie	53
Obrázek 43: Nezavakuovaná forma.....	53
Obrázek 44: Zavakuovaná forma.....	53
Obrázek 45: Vakuová infuze na 2 formách	53
Obrázek 46: Odformovaná deska	54
Obrázek 47: Řezačka vodním paprskem	55
Obrázek 48: Křehký systém CHS epoxy 520 a Telalit 420	55
Obrázek 49: Tvrdoměr WPM LEIPZIG HPO 250	60
Obrázek 50: Graf rázové houževnatosti systémů se tkanou textilií.....	63
Obrázek 51: Graf rázové houževnatosti systémů s netkanou rohoží	63
Obrázek 52: Graf meze pevnosti v ohybu pro systémy se tkanou textilií	65
Obrázek 53: Graf meze pevnosti v ohybu pro systémy s netkanou rohoží.....	65
Obrázek 54: Graf meze pevnosti v tahu systémů se tkanou výztuží	67
Obrázek 55: Graf meze pevnosti v tahu systémů s netkanou rohoží	67
Obrázek 56: Kalibrační graf pro stanovení teploty při vytvrzovací charakteristice.	76
Obrázek 57: Závislosti vykreslené při vytvrzovací charakteristice A- kalibrace, B- 520+420, C- 501+420	76
Tabulka 1: Vlastnosti CHS Epoxy 520.....	45
Tabulka 2: Vlastnosti CHS Epoxy 501	45
Tabulka 3: Vlastnosti tvrdidla Telalit 590	45
Tabulka 4: Vlastnosti tvrdidla Telalit 420	46
Tabulka 5: Technické parametry rezervoáru RB 451 [40]	49
Tabulka 6: Vytvrzovací charakteristiky použitých systému.....	61

Tabulka 7: Stanovení obsahu nespalitelných složek u systému se tkanou textilií.....	62
Tabulka 8: Stanovení obsahu nespalitelných složek u systému s netkanou rohoží	62
Tabulka 9: Tabulka ohybových vlastností systémů se tkanou textilií	64
Tabulka 10: Tabulka ohybových vlastností systémů s netkanou rohoží	64
Tabulka 11: Tabulka tahových vlastností systémů se tkanou textilií	66
Tabulka 12: Tabulka tahových vlastností systémů s netkanou rohoží.....	66
Tabulka 13: Tabulka tvrdosti dle Brinella měřených systémů	68
Tabulka 14: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 520 a telalit 590 s netkanou rohoží ..	76
Tabulka 15: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 501 a telalit 590 s netkanou rohoží ..	77
Tabulka 16: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 520 a telalit 420 s netkanou rohoží ..	77
Tabulka 17: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 501 a telalit 420 s netkanou rohoží ..	77
Tabulka 18: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 520 a telalit 590 se tkanou textilií	78
Tabulka 19: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 501 a telalit 590 se tkanou textilií	78
Tabulka 20: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 520 a telalit 420 se tkanou textilií	78
Tabulka 21: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 501 a telalit 420 se tkanou textilií	79
Tabulka 22: Tabulka ohybových vlastností systému 501+590T	79
Tabulka 23: Tabulka ohybových vlastností systému 501+590N.....	79
Tabulka 24: Tabulka ohybových vlastností systému 520+590T	80
Tabulka 25: Tabulka ohybových vlastností systému 520+590N.....	80
Tabulka 26: Tabulka ohybových vlastností systému 520+420N.....	80
Tabulka 27: Tabulka ohybových vlastností systému 520+420T	81
Tabulka 28: Tabulka ohybových vlastností systému 501+420N.....	81
Tabulka 29: Tabulka ohybových vlastností systému 501+420T	81
Tabulka 30: Tabulka tahových vlastností systému 501+420T	82
Tabulka 31: Tabulka tahových vlastností systému 501+590T	82
Tabulka 32: Tabulka tahových vlastností systému 520+590T	83
Tabulka 33: Tabulka tahových vlastností systému 520+420T	83
Tabulka 34: Tabulka tahových vlastností systému 501+590N.....	84
Tabulka 35: Tabulka tahových vlastností systému 520+590N.....	84
Tabulka 36: Tabulka tahových vlastností systému 520+420N.....	85
Tabulka 37: Tabulka tahových vlastností systému 501+420N.....	85

Rovnice 1: Výpočet viskozity.....	55
Rovnice 2: Výpočet epoxidového ekvivalentu	56
Rovnice 3: Výpočet aminového čísla tvrdidla	57
Rovnice 4: Výpočet reakčního poměru	58
Rovnice 5: Výpočet obsahu nespalitelných složek.....	58
Rovnice 6: Výpočet rázové houževnatosti.....	59

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

AF	Aramidová vlákna
APC	Aromatický polymerní kompozit
DETA	Diethylentriamin
EP	Epoxidová pryskyřice
HDPE	Polyethylen o vysoké hustotě
IPDA	Isoforondiamin
IR	Polyisoprenový kaučuk
LDPE	Polyethylen o nízké hustotě
LLDPE	Lineární polyethylen o nízké hustotě
NBR	Akrylonitrilbutadienový kaučuk
PA 6	Polyamid 6 (Silon)
PA 66	Polyamid 66 (Nylon)
PAN	Polyakrylonitril
PBTP	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PEEK	Polyéteréterketon
PET	Polyethylentereftalát
PF	Fenoplast
PMMA	Polymethylmethakrylát
PP	Polypropylen
PPS	Polyfenylsulfid
PVC	Polyvinylchlorid
SAF	Speciální akrylová vlákna
SCRIMP	Seeman's composite resin infusion molding
TETA	Triethylentetramin
UP	Nenasycená polyesterová pryskyřice

0 ÚVOD

Již od pravěku člověk vyhledával ten nejvhodnější materiál, který se mu hodil pro dané použití, jako např. nejlepší kámen pro sekeru. Toto pokračovalo dlouhou dobu bez nějakého výrazného posunu kupředu. Jako první významné kompozity lze v dějinách brát hliněné cihly plněné slámou sušené na slunci, damažskou ocel, mongolské luky, či cement a beton dochovaný z dob Říma. První významný konstrukční materiál použitý v moderní době a ve velké míře byl beton vyztužený ocelovými dráty, který dal vzniknout zejména výškovým budovám.

Kompozitní materiály používané pro konstrukce v dnešní době jsou vytvářeny přímo pro speciální aplikace, kdy je dbán důraz především na vlastnosti, které budou potřebné pro danou aplikaci. Není výhodné konstruovat dokonalé materiály vynikajících vlastností, pokud ve výsledné aplikaci nebudou využity.

Kompozity na bázi polymerních matric známe již z dob, kdy byl hojně využíván bakelit, který se plnil různou anorganickou moučkou. Mezi nejstarší kompozity tohoto typu patří také pryž, která je plněna sazemí a mnoha dalšími plnivými. Kompozity na bázi reaktoplastických pryskyřic zejména nenasycených polyesterových a epoxidových začínají psát svou historii těsně před začátkem 2. světové války a největšího výzkumu dosáhli v 50. letech minulého století. Kompozity na této bázi jsou velmi používané do dnes pro mnoho konstrukčních využití z důvodu vynikajících mechanických vlastností, které závisí zejména na obsažené výztuži, jelikož úkolem matrice je pouze přesun napětí mezi výztuží.

Cílem této práce je shrnout problematiku kompozitů na základě různých matric a výztuží. Poté vyrobit vzorky, které budou obsahovat různé formy matric a výztuží a pomocí měření mechanických vlastností stanovit závěr nad tím, zda platí obecné podmínky pro kompozity a také porovnat výsledné vzorky mezi sebou.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály, též kompozity, jsou multifunkční materiálové systémy, které mají vlastnosti nezískatelné žádným z jednotlivých materiálů. Jsou to kohezní struktury vytvořené fyzikální kombinací dvou anebo více kompatibilních materiálů, lišících se složením a vlastnostmi. Kompozitem tedy může být převážná část materiálů, jak již vytvořených člověkem, tak i přírodou. První zmínka o kompozitu pochází již z bible, kde je zmínka o hliněných blocích plněných slámou. Hlavní složky kompozitu jsou *matrice* a *výztuž*, potažmo *plnivo*. U kompozitu je velmi důležité, aby mezi složkami kompozitu nastal tzv. *synergický efekt*. [1; 2]

Jako synergický efekt označujeme takový stav, kdy kombinací složek získáme celek, jehož vlastnosti výrazně přesahují pouhý součet vlastností samotných složek. [3]

Kompozity můžeme dělit dle různých charakteristik, např. podle disperzní fáze:

- *Kompozit prvního typu*: nejčastěji využívaný druh, disperze je pouze z pevné fáze.
- *Kompozit druhého typu*: tento druh kompozitu není příliš častý, disperze je z kapalné fáze. Patří sem některé pórovité struktury vyplněné kapalinou.
- *Kompozit třetího typu*: disperzní fáze je zde plynná a patří sem tzv. pěnové materiály, dále také různé vláknové struktury s vlákny buď slinutými, nebo spojenými malým množstvím pojiva (matrice zde ale není spojitá).

Dále je můžeme dělit dle typu použité matrice na:

- *Kompozity s plastovou matricí*
- *Kompozity s kovovou matricí*
- *Kompozity s keramickou matricí*
- *Kompozity se skleněnou matricí*

Posledním z typického dělení je dělení podle tvaru výztuže:

- *Částicové kompozity*
 - o *Izometrické*
 - o *Neizometrické*

- *Vláknové*
 - o *Spojité vlákna*
 - o *Dlouhá vlákna*
 - o *Krátká vlákna*
- *Deskové*

Využití kompozitů je momentálně velmi rozsáhlé a jsou to moderní materiály, které mohou mít nespočet vlastností podle použitých matric a výztuží. Lze definovat několik hlavních oblastí využití, těmi jsou: spotřební zboží, kde je zejména využíváno rohoží jako výztuže a je zde potřeba vysoké kvality povrchové úpravy. Další oblast využití je pro průmyslové aplikace, kdy jsou používány pryskyřice se zvláštními užitkovými vlastnostmi, které jsou potřeba pro konkrétní průmyslové použití. Vyztužují se zejména skelnými vlákny. Poslední rozlehlou a velmi důležitou oblastí jsou výrobky pro speciální účely, zejména letectví a kosmonautika, vojenské účely a sport. Zde se používají ty nejlepší pryskyřice s vynikajícími vlastnostmi. Nejčastěji to jsou pryskyřice epoxidové, které jsou vyztuženy uhlíkovými, nebo aramidovými vlákny. [1; 3]

1.1.1 Matrice

Matrice je materiál, kterým je prosycen systém výztuže, zejména vláken, čímž vznikne tvarově stálý výrobek. Matrice má zpravidla nižší pevnostní vlastnosti, ale větší plasticitu než výztuž. Spojením matrice a plniva, či výztuže vzniká kompozit. [3; 4; 5]

Úkolem matrice v kompozitu je [3; 4]:

- držet výztuž pohromadě a zajistit tvarovou stálost výrobku
- přenášet namáhání na vlákna
- přenášet namáhání z vláken na vlákno
- chránit výztuž před vnějšími vlivy, zejména chemikáliemi, nebo vlhkostí
- chránit vlákna od mechanické degradace, zejména abraze

U matric je velmi důležitá adheze k vláknům na rozhraní matrice a výztuže. Vlákna se také mohou apretovat, aby se vlákno stalo vhodné k matrici, kterou chceme, nebo musíme použít pro konkrétní účely. Matrice musí mít také vhodnou viskozitu a smáčivost, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. Volíme ji takovou, aby měl výsledný kompozit vlastnosti, které jsou potřeba. Měla by mít větší prodloužení při tahovém namáhání než výztuž, aby dále plnila funkci pojiva i když výztuž již začíná praskat. Tuto vlastnost ovšem splňují pouze polymerní a kovové matrice. Skleněné a keramické matrice tuto vlastnost nemají. [3; 5]

Nejčastěji používané typy matic jsou matrice polymerní, jak reaktoplastické, tak termoplastické, přičemž první jmenované jsou používanější. Kompozity s termoplastickými maticemi jsou levnější, mají vyšší houževnatost a umožňují opětovné tepelné zpracování. Jejich největším nedostatkem je však creep materiálu při dlouhodobém zatížení. Tyto kompozity jsou tedy využitelné pouze hluboko pod teplotou T_g . Reaktoplastické matrice pro kompozity se teplem vytvrzují a vzniká tak zesíťovaná struktura, díky tomu mají reaktoplastické matrice větší odolnost proti chemikáliím, či vyšší tvarovou stálost za tepla a tepelnou odolnost. Nevýhodou reaktoplastů je jejich nízká houževnatost, creep je minimální. Dalším typem používaných matic jsou matrice kovové, ty zajišťují některé vlastnosti, které polymery nemají, jako např. elektrická a tepelná vodivost, nehořlavost, smyková pevnost, tvárnost, odolnost proti obrusu, vyšší tepelná odolnost, či odolnost proti vlhkému prostředí. Jejich nevýhodou je nižší pevnost, tuhost a vyšší energetické nároky při výrobě. Posledním typem běžně používaných matic jsou matrice keramické, které mají vynikající tepelnou stabilitu, odolnost proti teplotnímu šoku, vysoký modul, či velkou tvrdost. Nevýhodou je jejich vysoká lámavost, kvůli které se také vyztužují. [1; 4; 6]

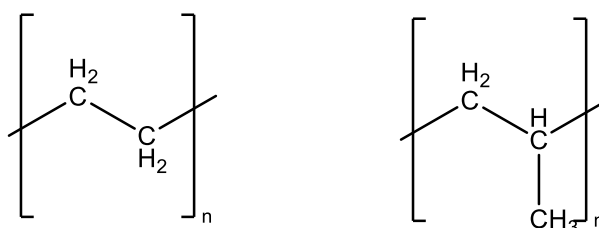
1.1.1.1 Termoplasty

Plast, který po zahřátí přechází do plastického stavu a stává se tvárným. Po ochlazení zatuhne do tvaru, který mu byl dán při zpracování. Lze to dělat opakovaně, čímž se liší od reaktoplastů, u nichž po zahřátí proběhne chemická reakce a po ochlazení je nelze zahřátím opět převést do tvárného stavu. Mezi termoplasty patří např. polyolefiny jako polyethylen (PE), polypropylen (PP). Dále pak polymethylmethakrylát (PMMA), polyvinylchlorid (PVC) či polyamidy (PA) jako PA 6 a PA 66. Mezi nejvýznamnější termoplasty využívané k výrobě kompozitů patří polyéterétherketon (PEEK), PP, polykarbonáty (PC), polybutylentereftalát (PBTP), polysulfon, polyfenylsulfid (polythio-1,4-fenylen) (PPS), či tavitelné kopolymery tetrafluorethylenu. [1]

Jejich nevýhoda je hlavně nutnost práce s taveninou, která je viskóznější než u reaktivních pryskyřic, dále pak je potřeba vyšší lisovací tlak, 200-300 N/m. Pracuje se při vyšších teplotách, které jsou omezeny teplotou rozkladu. Viskozita termoplastů je ve srovnání s reaktoplasty sto až tisíci násobná. Jejich odolnost proti stárnutí je dána typem použité matrice. Jejich výhodou je, že jsou levnější než reaktoplastické, či kovové matrice. Mezi další výhody patří schopnost vytvořit složitější tvary, či malý obrus, zejména při použití uhlíkových vláken, s nimiž se snižuje i součinitel tření. Dále mají vysokou houževnatost, zvýšený modul a pevnost v tahu. [1; 3]

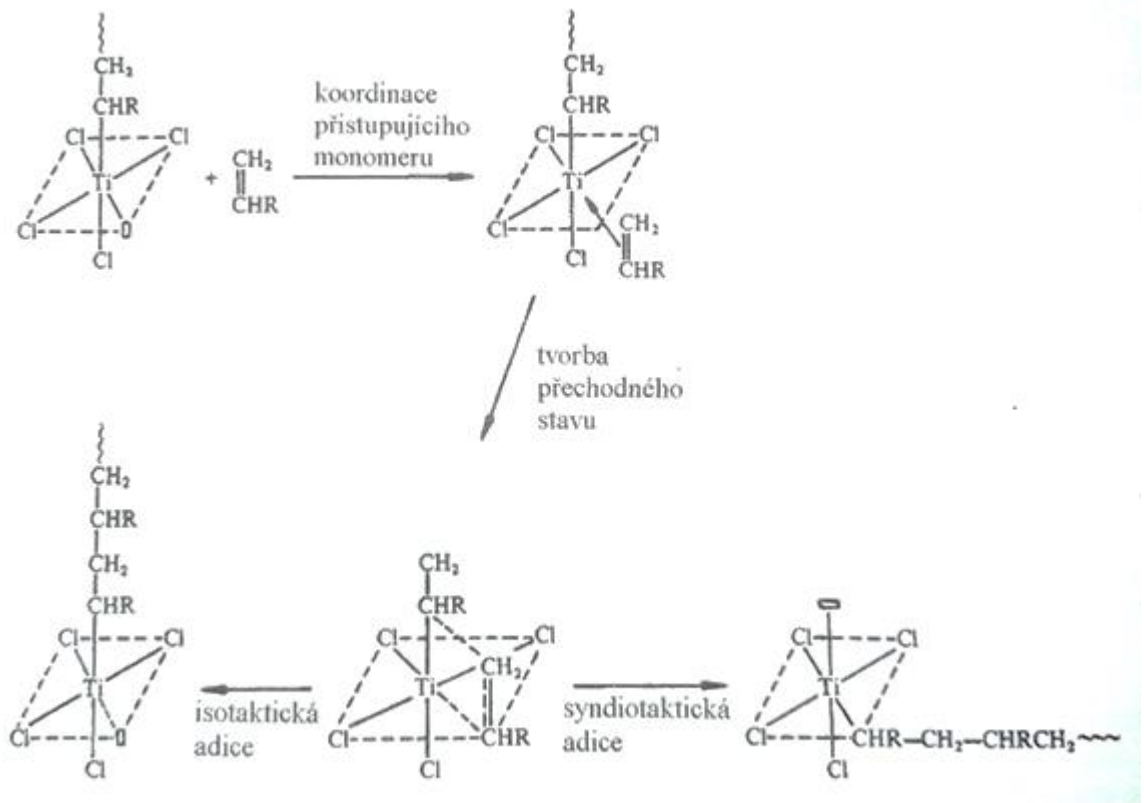
1.1.1.1.1 Polyolefiny

Jsou největší skupinou vyráběných syntetických polymerů. Největší část jejich výroby připadá na polyethylen a polypropylen (Obrázek 1). Celková výroba polyethylenu činila k roku 2013 81,8 milionu tun, s tím, že v r. 2018 je předpokládána výroba 99,6 milionu tun, přičemž k největšímu zvýšení produkce dochází v Asii. Většinu výroby tvořil HDPE, následovaný LLDPE a LDPE. Celková výroba polypropylenu je menší, k roku 2011 bylo celosvětově vyrobeno 52,2 milionu tun. Většina výroby obou hlavních polyolefinů je vedena pomocí Ziegler-Nattových katalyzátorů (Obrázek 2). Hlavními zdroji monomerů pro jejich výrobu jsou: zemní plyn a ropa, ze které se vyrábí krakováním. [7; 8; 9]



Obrázek 1: Vzorec polyethylenu (vlevo) a polypropylenu (vpravo)

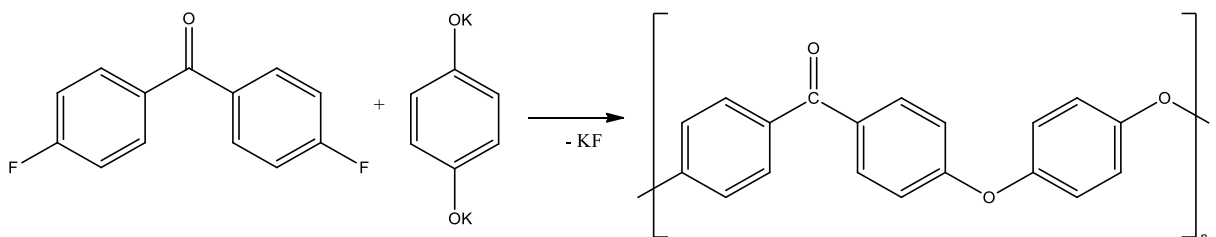
Kompozity polyolefinů vznikají hlavně přidáním plniva anorganické látky ve formě jemných částic. Tato plniva mají tu vlastnost, že směs kompozitu lze zpracovávat stejnými technologiemi jako původní polyolefin. Nejčastější anorganické plniva jsou: slída, mastek a uhličitan vápenatý. Částice plniva ztrácí na polyolefin vliv, pokud jsou menší než 0,1 až 0,01 μm, což jsou rozměry nehomogenit u polyolefinů. Dále se používají jako výztuž skleněná vlákna, ať již jako střiž, která je chaoticky uspořádána, nebo nekonečně dlouhá vlákna. V některých odvětvích se také používají vlákna uhlíková. Kompozity polyolefinů plněné anorganickými látky ve formě jemných částic mohou mít v závislosti na použitém plnivu menší hořlavost, nižší koeficient tepelné roztažnosti, či tvrdost. [6; 10]



Obrázek 2: Schématické znázornění stereoregulární polyinsertce [11]

1.1.1.1.2 Polyetheretherketon

Patří do skupiny polyetherů spolu s fenoxypřyskyřicemi, polyfenylenoxidem, či polyethylenoxidem. Vyrábí se reakcí ze 4,4-difluordifenylketonu s draselnou solí hydrochinonu (Obrázek 3). [7]



Obrázek 3: Syntéza polyetheretherketonu

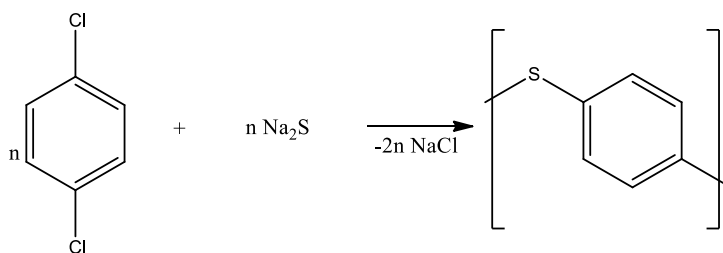
Je to krystalický polymer s krystalinitou až 48 %, běžně však mezi 30 % a 35 %. Lze jej vyrobit i amorfni, pokud taveninu prudce ochladíme. Má mimořádnou odolnost proti rozpouštědlům, výbornou hydrolytickou stabilitu či tepelnou stálost, tu lze ještě zdokonalit

vyztužením. Má nízkou nasákavost ve vodě, a to do 0,5 % při 23 °C. PEEK má teplotu skelného přechodu 143 °C, teplota tání krystalů je 335 °C. [4; 7]

Tvarová stálost za tepla při tlaku 1,8 MPa je 155 °C, pokud je vyztužen 30 % skelných vláken, pak je tvarová stálost za tepla až 315 °C. Kompozit PEEK s nekonečně dlouhými uhlíkovými vlákny je znám jako aromatic polymer composite (APC), má vyšší modul pružnosti i pevnost v tahu než čistý PEEK. Kompozit PEEK vyztužen aramidovými vlákny má ještě lepší mechanické vlastnosti než APC, je ovšem výrazně dražší a na běžné průmyslové využití stačí APC, jelikož i samotný PEEK patří mezi dražší polymery. [4; 12; 13]

1.1.1.1.3 Polyfenylensulfid (polythio-1,4-fenylen)

Patří do skupiny polysulfidů. Vyrábí se syntézou p-dichlorbenzenu se sulfidem sodným, reakce probíhá v prostředí polárního rozpouštědla, kterým je N-methyl-pyrrolidon (Obrázek 4). [7; 14]



Obrázek 4: Syntéza polyfenylensulfidu

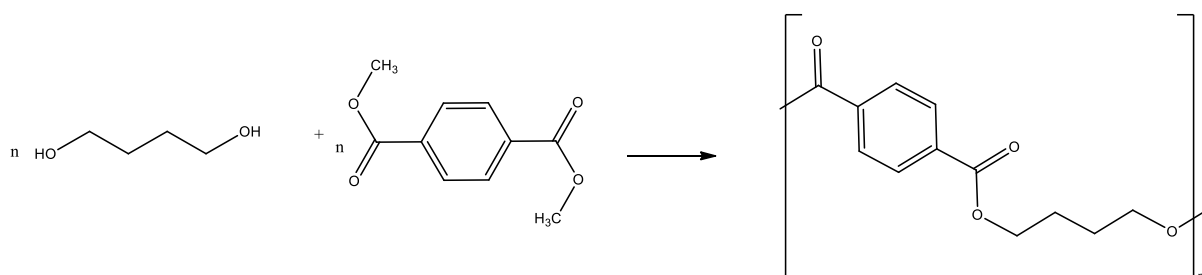
Je to bílý semikrystalický polymer, jehož krystalinita dosahuje zpravidla 65 %. Polyfenylensulfid (PPS) má teplotu skelného přechodu 88 °C a bod tání 285 °C. Do 175 °C je nerozpustný ve všech rozpouštědlech, nad touto teplotou se rozpouští v chlorovaných aromátech. Má velmi dobrou odolnost proti hydrolyze a nepatrnou nasákavost, avšak oxidačním činidlům dlouhodobě neodolává. Má dobré elektroizolační vlastnosti a nesnadno hoří. Má výbornou stálost za tepla, hmotnostní úbytky lze při DTA pozorovat až nad 400 °C. Tvarová stálost za tepla může být až 260 °C, kdy záleží na zatížení. Při tlaku 0,45 MPa se pohybuje okolo 260 °C, po zvýšení tlaku na 1,8 MPa se teplota tvarové stálosti sníží na 240 °C. Je vysoce nevhodný pro venkovní aplikace, jelikož má kvůli benzenovým jádrům velmi malou odolnost proti UV. Dále má nepatrnou houževnatost. [4; 7; 14]

Pro zvýšení houževnatosti se plní skleněnými vlákny. Kompozity PPS se skleněnými vlákny mají ještě vyšší tvarovou stálost za tepla, a hlavně trvalou tepelnou odolnost, splňují požadavky na požární bezpečnost, a jsou díky tomu vhodné pro použití uvnitř budov, či na

kabiny letadel. Tvarová stálost PPS plněného 60 % skleněných vláken dosahuje až 310 °C. Pro zvýšení mechanických vlastností lze PPS plnit uhlíkovými vlákny, kdy při obsahu 30 % uhlíkových vláken dojde k nárůstu meze pevnosti v tahu ze 138 MPa až na 185 MPa. Pro některé technické účely se plní i aramidovými vlákny. [7; 12; 15]

1.1.1.1.4 Polybutyltereftalát

Patří do skupiny polyesterových pryskyřic například s polyethyltereftalátem, či polykarbonátem. Vyrábí se transesterifikační reakcí 1,4-butandiolu s dimethyltereftalátem (Obrázek 5). [16]



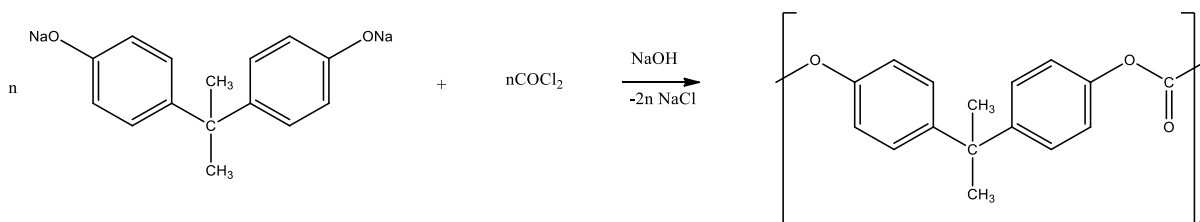
Obrázek 5: Syntéza polybutyltereftalátu

PBTP je krystalická termoplastická polyesterová pryskyřice s teplotou skelného přechodu 225 °C a teplotou tání 260 °C. Je odolný proti oděru a má velkou rázovou houževnatost a rozměrovou stabilitu. Odolává řadě chemikálií a má nízkou nasákavost ve vodě. Nemá příliš vysokou tvarovou stálost za tepla. Tvarová stálost při 0,46 MPa je 160 °C ovšem při 1,8 MPa je pouze 70 °C. Velmi rychle krystalizuje, a proto je jeho využití největší hlavně při vstřikování dílů pro automobilový průmysl, kde se používá také ve směsi s polykarbonátem. Jeho obliba roste velmi rychle a vyrábí ho mnoho výrobců pod různými názvy. Dále se používá v elektrickém a elektrotechnickém průmyslu, kde ovšem musí být plněn retardéry hoření. [7; 17; 18]

Z kompozitů vyrobených z PBTP se uplatňují převážně kompozity plněné skleněnými vlákny. Při obsahu 15 % skleněných vláken se zvýší pevnost v tahu téměř dvojnásobně, nárůst pevnosti v tahu je z 53 MPa až na 100 MPa. Pokud zvýšíme podíl skleněných vláken na 35 %, dosáhneme pevnosti v tahu až 129 MPa. Kompozit PBTP spolu se skleněnými vlákny má taky vyšší dielektrickou sílu a to až 117 kV/mm, oproti původním 15 kV/mm u čistého materiálu. Přidáním skelné výztuže se ovšem snižuje maximální prodloužení při protažení a zvyšuje se absorpce vody. [12; 15; 17]

1.1.1.1.5 Polykarbonáty

Další ze zástupců polyesterových pryskyřic. Polykarbonáty (PC) lze vyrábět několika způsoby, tím prvním je reakce bisfenolu A [2,2-bis-(4-hydroxyfenyl)propanu] s fosgenem v prostředí NaOH, popř. pyridinu. Dalším ze způsobu výroby je použití ko-monomeru difenylkarbonátu, kdy se v ekvimolárním množství smíchává s dianem bez přístupu kyslíku. Z reakce odpadáva jako zbytek fenol (Obrázek 6). [7; 19]



Obrázek 6: Syntéza polykarbonátu z Bisfenolu A a fosgenu

PC jsou amorfni transparentni polymery. Vyznacujici se vysokou propustnosti svetla, az 91 %, take maji vysoký index lomu $n_d^{20} = 1,587$. Teplota skelného přechodu je 145-150 °C, tvarová stálost za tepla je 135-160 °C při tlaku 0,45 MPa a 125-145 °C při tlaku 1,8 MPa. Jsou dobře rozpustné v cyklohexanonu, či chlorovaných uhlovodících. Velmi špatně se rozpouští v ketonech, aromatických uhlovodících, či esterech a odolávají zředěným kyselinám, roztokům mýdel, alifatickým uhlovodíkům i alkoholům. Disponují značnou stálostí proti oxidaci, a to až do 120 °C. Jsou také odolné proti UV-záření a díky tomu se hodí pro venkovní aplikace. Absorpce vody je sice nízká, ale dlouhodobě neodolávají teplé vodě, ani vodním parám. Mají vysokou rázovou houževnatost a vysokou mechanickou pevnost, zejména v tahu. PC o \overline{M}_w 20 000 až 40 000 se používají pro vstřikování či vytlačování. PC o vyšší \overline{M}_w se používají hlavně ke zpracování z roztoku, jelikož jejich tavenina má vysokou viskozitu. Využívá se hlavně v automobilovém průmyslu a v elektrotechnice. Díky jejich propustnosti světla z viditelného spektra se používají jako náhrada skla. [7; 20; 21; 22]

Pro kompozity z polykarbonátů se používá celá řada výztuží a plniv. Mezi základní výztuže patří skleněná, uhlíková, či aramidová vlákna, lze také použít vlákna z nerezavějící oceli nebo uhlíkové nanotrubičky. Při použití 10 % skelné výztuže se zvýší mez pevnosti v tahu z 62 MPa až na 84,8 MPa, pokud obsah výztuže zvýšíme na 40 %, pak mez pevnosti v tahu naroste až na 165 MPa. Ovšem se zvýšením obsahu skelné výztuže se snižuje maximální protažení z 60 % na 6 %. Při použití uhlíkových nanotrubiček dochází k poklesu elektrického odporu a zvýšení elektrické vodivosti, dále pak dochází k nárůstu meze pevnosti v tahu o 30 %

při použití 6 hmotnostních % výztuže z uhlíkových nanotrubic. Kompozit tohoto typu je vhodný pro použití jako vodič. [12; 23; 24]

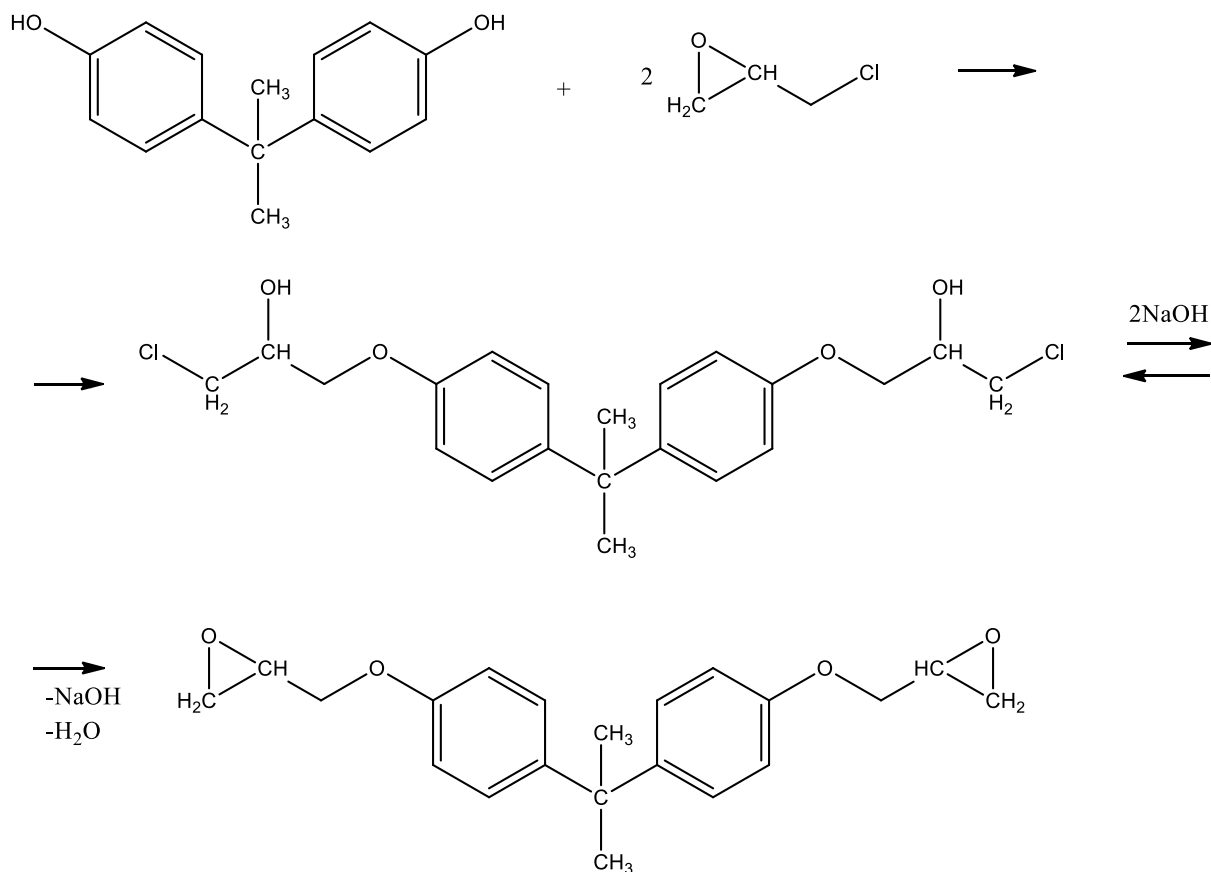
1.1.1.2 Reaktoplasty

Jsou polymery, u kterých při zpracování probíhá vytvrzovací reakce, ať již teplem, nebo za pomoci tvrdidla, a vzniká zesítená struktura. Reaktoplasty se od termoplastů liší zejména tím, že při ohřátí znovu nepřechází do plastického stavu. Mezi reaktoplasty se řadí epoxidové pryskyřice (EP), nenasycené polyesterové pryskyřice (UP), fenoplasty (PF), různé druhy kaučuků (IR, NBR atp.), vinylesterové pryskyřice nebo furanové pryskyřice, jako furfurylalkoholové pryskyřice. Ve vláknových kompozitech jsou nejvíc využívány nenasycené polyesterové pryskyřice a epoxidové pryskyřice. [7]

Jejich největší výhodou oproti termoplastům je jejich viskozita při zpracování, která se pohybuje v řádech stovek až tisíců mPas, což je až tisíci násobně méně než u tavenin reaktoplastů. Energie se spotřebuje méně, jelikož se zpracovávají při nižších teplotách než termoplasty. Reaktoplasty díky své viskozitě lépe prosycují vlákna a taky je mnohonásobně lépe smáčí. Díky trojrozměrné zesítené struktuře materiály dosahují vysoké pevnosti a tuhosti, ovšem mají velmi malou houževnatost a tažnost. Zlepšit houževnatost lze přidáním modifikujících přísad, zejména změkčovadel. [3; 4]

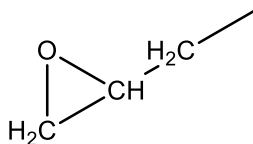
1.1.1.2.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou sloučeniny, které ve své molekule obsahují více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Nejčastěji se lze setkat s pryskyřicemi glycidylového typu, které se připravují reakcí 2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propanu (Bisfenolu A) s epichlorhydrinem. Reakce probíhá ve dvou krocích, nejdříve probíhá adice epoxidové skupiny epichlorhydrinu na fenolický hydroxyl. Poté v druhém kroku dojde pomocí NaOH k odštěpení chlorovodíku ze vzniklých chlorhydrinetherů za vzniku epoxidových skupin (Obrázek 7). [7]

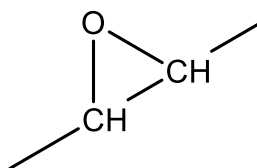


Obrázek 7: Syntéza epoxidové pryskyřice

Za normální teploty to jsou kapalné až pevné látky o \bar{M} od cca 340 do 3800. Lze je dělit na 2 skupiny, na ty, které obsahují glycidylové (2,3-epoxypropylové) (Obrázek 8) skupiny připravené reakcí epichlorhydrinu s vhodnými surovinami (Bisfenol A, Bisfenol F atd.). A na ty, které obsahují epoxidové skupiny (Obrázek 9), připravené epoxidací nenasycených sloučenin. [3; 7]



Obrázek 8: Glycidylová skupina



Obrázek 9: Epoxidová skupina

Vytvrzování epoxidových pryskyřic

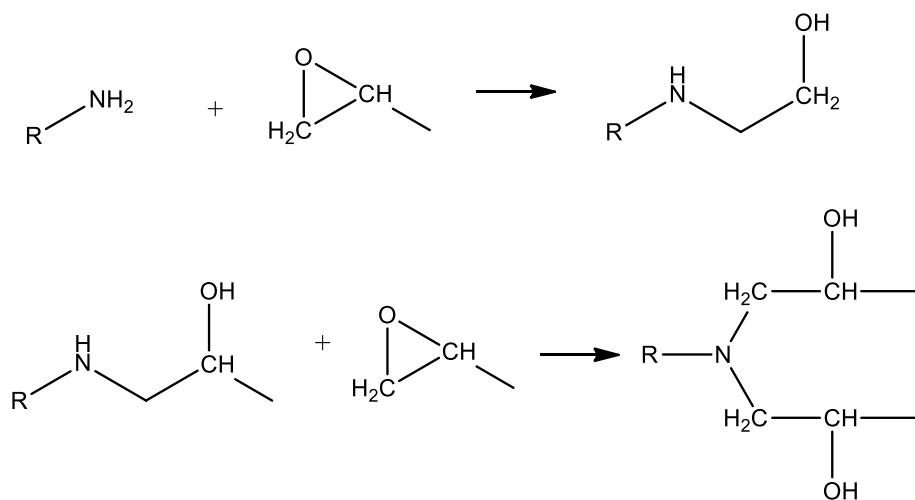
Epoxidy lze vytvrzovat třemi základními způsoby:

- Polyadici, která probíhá na epoxidových skupinách
- Polykondenzací na přítomných hydroxylových skupinách
- Polymerací epoxidových skupin

Nejběžnější je vytvrzování adicí probíhající na epoxidových skupinách. K adici jsou vhodné v podstatě všechny sloučeniny s pohyblivými vodíkovými atomy. Nejčastěji používané jsou při vytvrzování polyaminy a anhydridy polykarboxylových kyselin. Dále lze pro vytvrzování použít např. polythioly. [7]

1) Vytvrzování polyaminy

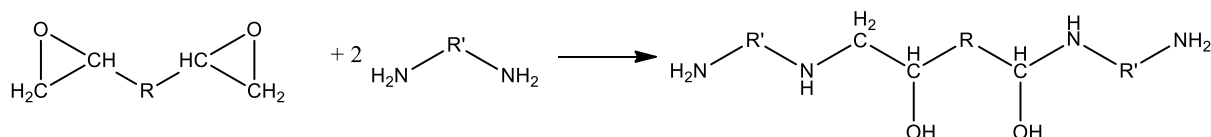
Používají se primární a sekundární alifatické polyaminy, které umožňují vytvrzovat za normální teploty. Při reakci vzniká hydroxylová a sekundární aminoskupina. Vzniklá sekundární aminoskupina dále reaguje za vzniku terciální aminoskupiny (Obrázek 10). Pro vznik zesítené struktury musí mít použitý amin min. 3 aktivní vodíkové atomy. Alifatické a cykloalifatické polyaminy za normální teploty vytvrzují epoxidy v poměrně krátké době. Nejběžnější aminy používané k vytvrzování epoxidů jsou diethylentriamin (DETA), triethyltetramin (TETA), dipropylentriamin, isoforondiamin (IPDA), N-aminoethylpiperazin a další cykloalifatické diaminy. Polyadice není na rozdíl od radikálové reakce řetězovou reakcí, a tak reakce probíhá pomalu mezi několika molekulami pryskyřice a tvrdidla za pomalého zvyšování molekulové hmotnosti. Reakční směs zůstává dlouho tekutá i když je již reakce v pokročilé fázi a je zde mnoho vazeb tvrdidlo-pryskyřice. Směs geluje až v pozdější fázi reakce. [3; 7]



Obrázek 10: Vytvrzování epoxidu za pomoci polyaminů

Důležitou charakteristikou epoxidu je tzv. *epoxidový ekvivalent*. Epoxidový ekvivalent je hmotnost epoxidu v gramech, který obsahuje 1 mol epoxidové skupiny. Pro zjištění správného poměru tvrdidla a epoxidu musíme také znát *vodíkový ekvivalent* použitého tvrdidla, což je hmotnost tvrdidla v gramech, které obsahuje 1 mol aktivního vodíku. Z těchto dvou hodnot pak lze lehce spočítat množství tvrdidla v %. V praxi se běžně tvrdidla používá přebytek do 10 %, jelikož použitý polyamin nebývá 100 % čistý. Větší přebytek se nepoužívá, jelikož může zhoršit vlastnosti vytvrzené pryskyřice. [3; 7]

Při použití alifatických aminů jako tvrdidel může dojít vlivem vlhkosti vzduchu k zakalení povrchu výsledné pryskyřice. Tento jev se netýká epoxidů vytvrzovaných cykloalifatickými polyaminy. Tyto potíže s alifatickými polyaminy lze vyřešit tvorbou aduktu epoxidové pryskyřice s nadbytkem tvrdidla podle rovnice na Obrázku 11. [7]

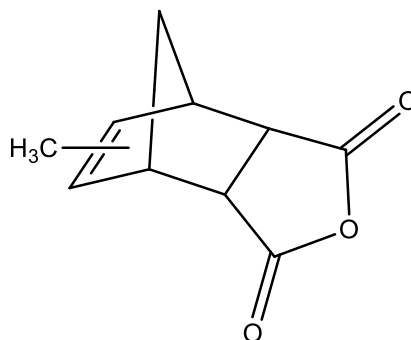


Obrázek 11: Tvorba aduktu

Tyto adukty jsou tvrdé netěkavé pryskyřice a využívají se dále jako tvrdidla. Díky tomu, že mají značně nižší koncentraci aminových vodíků než čisté alifatické polyaminy, se jich používá pro vytvrzování epoxidu větší množství a výsledná chyba při odměření není tak velká. [7]

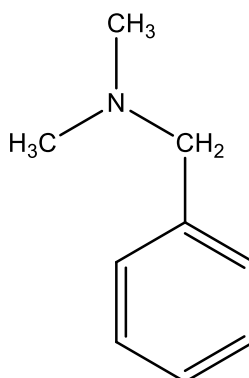
2) *Vytvrzování anhydridy*

Používají se anhydridy dikarboxylových kyselin, kdy vytvrzování probíhá na rozdíl od polyaminů za zvýšené teploty. Vytvrzování probíhá několik hodin při teplotách od 100 do 200 °C. Používají se anhydridy za normální teploty jak tuhé, tak kapalné. Mezi běžně používané tuhé anhydridy patří ftalanhydrid, hexahydroftalanhydrid, či anhydrid kyseliny bicyklo[2,2,1]-hept-5-en-2,3-dikarboxilové, též zvaný Nadic anhydrid. Z kapalných anhydridů se používá anhydrid kyseliny dodecenylijantarové, nebo tzv. methyl-Nadic anhydrid (Obrázek 12). Reakce není tak silně exotermní, jako při vytvrzování polyaminy a výsledné produkty mají podobné mechanické vlastnosti. Nevýhodou je, že jsou méně odolné alkáliím. [7; 17]



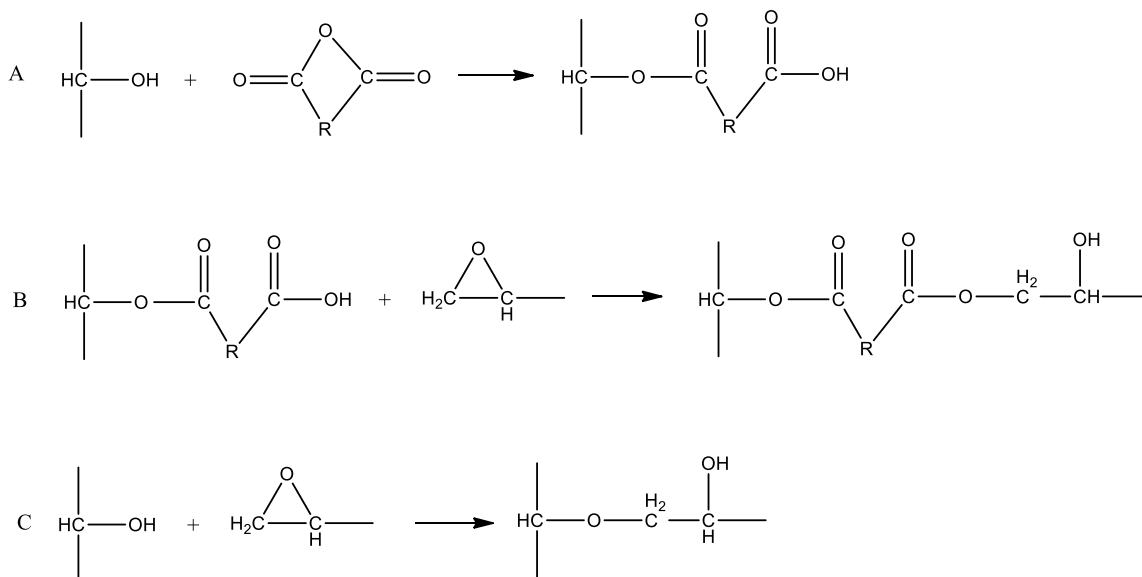
Obrázek 12: Methyl-Nadic anhydrid [25]

Při vytvrzování pomocí anhydridů se používají urychlovače, jako např. benzyldimethylamin (Obrázek 13), 2,4,6-tris-(dimethylaminomethyl)fenol, též zvaný DMP 30, nebo 2-(dimethylaminomethyl)fenol (DMP 10). [7]



Obrázek 13: Benzyldimethylamin

Samotné vytvrzování je velmi komplexní, ale lze ho v podstatě popsat třemi základními reakcemi. První probíhá otevření anhydridového kruhu pomocí alkalického hydroxyly (obsahuje ho epoxid) a vzniká monoester, reakce je katalyzovaná terciálními aminy, fenoly a alkoholy (Obrázek 14A). Poté reakcí vzniklé volné karboxylové skupiny s epoxidovou skupinou vzniká diester a nová volná hydroxylová skupina (Obrázek 14B). Druhá reakce je katalyzovaná stejně jako reakce první. Třetí je kyselá katalyzovaná polymerace epoxidových skupin za vzniku etherových vazeb (Obrázek 14C). Pro reakci se bez přítomnosti urychlovače používá 85–90 % teoretického množství anhydridu, jelikož dochází ke ztrátě epoxidových skupin polymerací. Při použití urychlovače lze použít teoretické množství anhydridu. Objemové smrštění epoxidu je velmi nízké, od 2 do 5 %. [3; 7; 17]



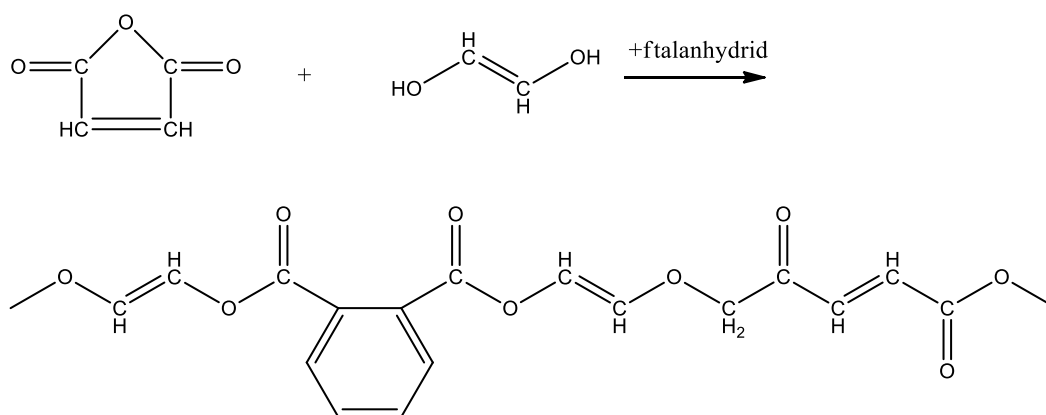
Obrázek 14: Vytvrzování epoxidů anhydridem

Epoxidy se využívají pro vysoce kvalitní kompozity, jejichž využití je zejména v elektrotechnice, letectví, kosmonautice, či pro výrobu sportovního náčiní. Velmi důležité je jejich využití pro rotory větrných elektráren, jelikož zde nejdou použít nenasyčené polyesterové pryskyřice. Díky vysoké kvalitě jsou epoxidové pryskyřice často využívány pro drahé výztuže, např. pro kompozity s uhlíkovými vlákny používané pro konstrukce letadel. Viskozita epoxidových pryskyřic ve směsi s tvrdidlem je vyšší než u nenasyčených polyesterových pryskyřic, což zhoršuje schopnost prosycení vláken. Proto se v posledních letech vyvinuly speciální epoxidové pryskyřice modifikované ředidlem, které jsou ideální pro vakuovou infúzi, kde musí pryskyřice prosytit velmi velký úsek výztuže. [3; 7]

Vlastnosti epoxidů závisí na typu použité pryskyřice a zejména na použitém tvrdidle. Obecně ale lze říci, že mají výborné mechanické a tepelné vlastnosti. Dále mají dobré elektroizolační vlastnosti v široké oblasti teplot a jsou značně odolné proti vodě, roztokům alkálií, kyselin i některých rozpouštědel. Pevnost v tahu se může dle typu pohybovat okolo 100 MPa. Mají také vyšší tepelnou odolnost než nenasyčené polyesterové pryskyřice, nebo pryskyřice vinylosterové. Jejich nevýhodou je jejich cena, která velmi přesahuje běžné typy pryskyřic, dále mají vysokou viskozitu, co zhoršuje jejich zpracování a také způsobují alergické reakce a podráždění kůže. [2; 3; 6; 26]

1.1.1.2.2 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)

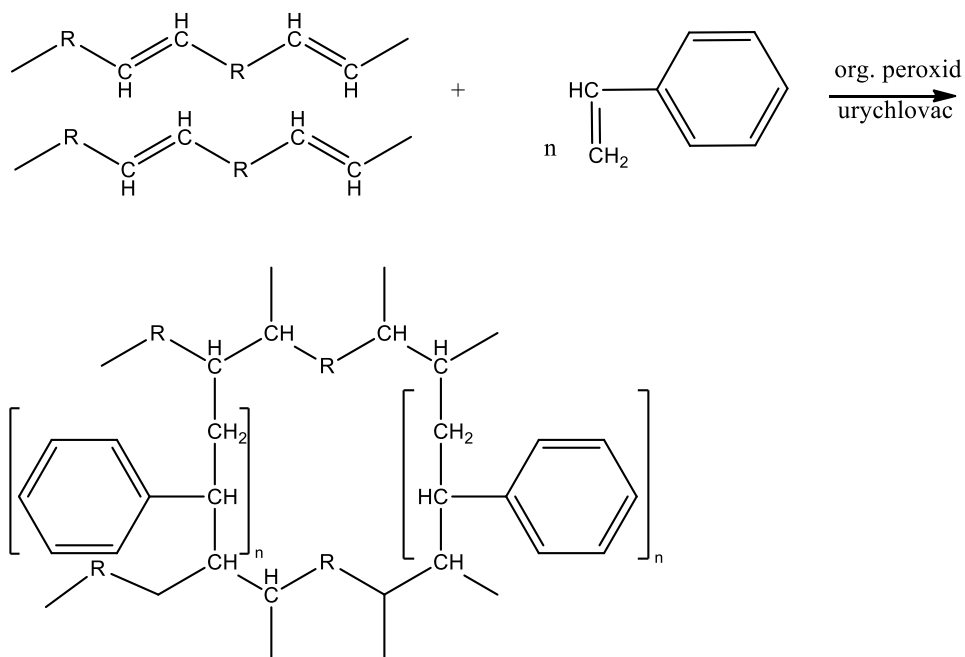
Patří do skupiny polyesterů, kde lze také nalézt např. PET, PBTP, PC, alkydy atd. Polyester byl poprvé připraven v roce 1847 z kyseliny vinné a glycerinu, první práce o UP se datují do roku 1894. UP se připravují reakcí nenasycené mastné kyseliny s diolem, první výzkum tohoto typu probíhal ve 20. letech minulého století, kdy se připravovali z ethylenglykolu a anhydridu kyseliny fumarové a maleinové. Výsledné UP jsou velmi viskózní, až tuhé látky. Polyesterifikace se provádí v tavenině při 210 °C, kdy převážná část kyseliny maleinové přejde na fumarovou. Jelikož při syntéze dochází ke ztrátě glykolů, používá se přebytek 5-10 %. Dále se do směsi z důvodu snížení reaktivity přidává i ftalanhydrid (Obrázek 15). Po skončení reakce se výsledná UP ochladí na 10 °C, stabilizuje přidávkem hydrochinonu a rozpustí v reaktivním monomeru, nejčastěji styrenu. [3; 7; 27]



Obrázek 15: Syntéza nenasycené polyesterové pryskyřice

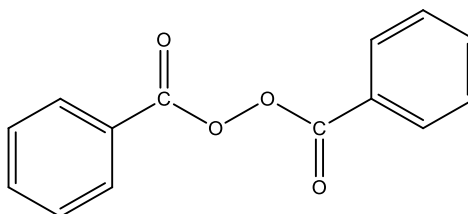
Vytvrzování UP

UP se vytvrzují díky radikálové kopolymerizaci dvojných vazeb pryskyřice a reaktivního monomeru, běžně je používán styren (Obrázek 16). Styren je používán, protože dobře rozpouští UP, dobře s ním kopolymeruje, má nízkou těkavost a je levný. Jako iniciátory radikálové reakce se používají organické peroxidy a urychlovače, významné jsou dva systémy, tím prvním je methylethylketonperoxid a kobaltový urychlovač, tím druhým je benzoylperoxid (Obrázek 17) a aminový urychlovač. [3; 7]



Obrázek 16: Vytvrzování nenasycené polyesterové pryskyřice

Aminové urychlovače urychlují vytvrzování i při nízkých teplotách (okolo 0 °C), ovšem výsledné vytvrzené UP vlivem UV záření žloutnou, a proto se při použití na povětrnosti upřednostňuje využití kobaltového systému. [3]

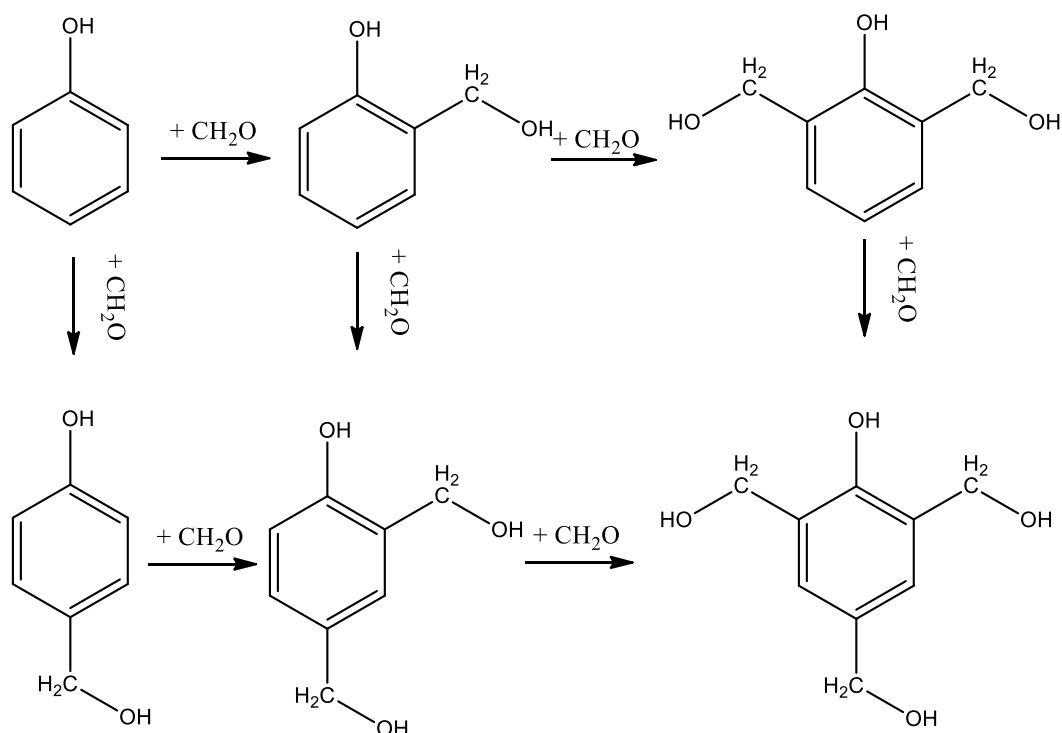


Obrázek 17: Dibenzoylperoxid

UP se hojně používají pro výrobu bezrozpuštědlových laků, plní se také nevytzužujícími plnivy jako je porcelánová moučka, kaolín, křída a jiné. Největší využití ovšem mají jako matrice kompozitů. Nejčastější forma výztuže jsou skleněná vlákna, čímž vznikají tzv. sklolamináty. Kompozity UP lze vyrábět většinou výrobních postupů, nejčastější však je ruční kladení. Jsou to nejvíce používané matrice pro kompozity z důvodu jejich nízké ceny. I když jejich vlastnosti nedosahují vlastností epoxidů, tak jsou pro většinu použití dostačující, jako např. na stavbu lodí, vozidel a letadel, ve stavebnictví, na výrobu různých nádrží atd. [3; 7]

1.1.1.2.3 Rezoly

Patří do skupiny fenoplastů spolu s novolakem. Jsou to pryskyřice vznikající alkalicky katalyzovanou polykondenzací fenolů s nadbytkem formaldehydu (Obrázek 18). Jsou to nejstarší termoreaktivní matrice pro polymerní kompozity. Charakteristickým znakem rezolu je schopnost působením tepla nebo kyselin přejít v nerozpustnou a netavitelnou hmotu zvanou rezit. Právě rezoly jsou schopné přejít v rezity pouze pokud jsou připraveny z trojfunkčních a čtyřfunkčních fenolů. [6; 7]



Obrázek 18: Syntéza rezolů

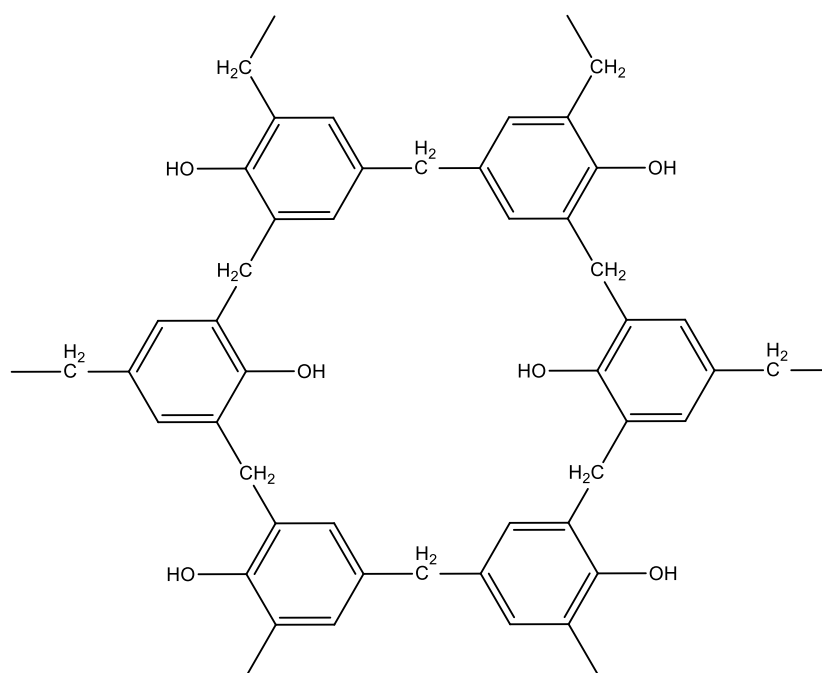
Rezoly jsou kapalné až pevné látky s bodem měknutí do $70\text{ }^\circ\text{C}$. Střední molekulové hmotnosti kapalných rezolů se pohybují okolo 300 g/mol^{-1} . U pevných pak do 1000 i když u některých pryskyřic na spodní hranici rezitového stavu byly zjištěny hodnoty do 5000. Rezoly jsou poměrně nestálé, a i za normální teploty pozvolna zvyšují svou viskozitu a během týdnů až roku přechází samovolně v rezity. [3; 7]

Vytvrzování rezolů

Rezoly se vytvrzují teplem, kyselinami, nebo výjimečně i reakcí s jinými reaktivními látkami. Základem vytvrzovacích reakcí je přítomnost reaktivních methylolových skupin, popř. i méně reaktivních dimethylenetherových můstků.

1) *Vytvrzování pomocí kyselin*

Při vytvrzování kyselin dochází k rychlé kondenzaci methylolových skupin s reaktivními vodíky ostatních fenolických jader v polohách ortho a zejména para za vzniku methylenových můstků. Kyselinami tvrzený rezit má jednodušší strukturu než ten, který je tvrzený teplem (Obrázek 19). [7]



Obrázek 19: Struktura rezit tvrzeného kyselinami

2) *Vytvrzování pomocí tepla*

Pokud rezoly vytvrzujeme teplem, tak vzniká podstatně složitější struktura rezitů. Nevznikají zde pouze methylenové můstky, ale také skupiny ethylenové, ethinové, methylolové a chinoidní seskupení, které zapříčiňuje špatnou stálost tvrzených rezitů na světle, jelikož se snadno oxidují. [7]

Vytvrzené rezity jsou vysoce chemicky a tepelně odolné, dále mají dobrou tvarovou stálost. Mají příznivé chování při požáru, při kterém si zachovávají vysokou zbytkovou pevnost. Samotné fenolické pryskyřice jsou křehké, a proto musí být většinou modifikovány. Nejvýznamnější plniva rezolů jsou dřevná moučka, celulózová vlákna, textilní odřezky, břidličná moučka, aj. Vlastnosti připravených pryskyřic jsou silně ovlivňovány druhem plniva, tvarem jeho částic a jeho množstvím. [3; 7]

Rezity, respektive rezoly, které se na ně převedou se nejčastěji zpracovávají lisováním, vstřikováním, litím, a vrstvením prosycených materiálu, např. papíru, tkanin. Dále se dají využít pro tvorbu lepidel, kyselinovzdorných tmelů, lehčených hmot a frikčních materiálů. Nejvýhodnější metoda zpracování je lisování, kdy musí být ve formě umístěny odvodušňovací kanálky, aby mohla unikat vznikající voda ve formě páry. [3; 7]

1.1.2 Výztuže

Výztuž je jedna nebo více nespojitých fází, prosycených fází spojitou, kterou tvoří matrice. Vlastnosti kompozitu jsou silně ovlivňovány vlastnostmi výztuže a jejich interakcí s matricí. Většina výztuží je použita z důvodu zlepšení mechanických vlastností jako je tuhost, pevnost, tažnost, vysokoteplotní odolnost atd. U částicových kompozitů se plnivo používá zejména z důvodu snížení ceny výsledného produktu. [6; 28]

Mechanismus pevnostního chování výsledného kompozitu záleží na [5; 28]:

- *Tvaru*, který může být uvažován jako koule pro práškové formy výztuže, nebo jako válec pro výztuže vláknité. Dále mohou být výztuže nepravidelného tvaru, destičková, či krychlová. Jejich velikost a distribuce řídí texturu kompozitu a mají důležitou úlohu spolu s objemovým podílem určují mezifázový povrch, který má důležitou úlohu při rozsahu působení mezi výztuží a matricí na zpevnění.
- *Koncentraci*, která představuje objem výztuže udávaný v objemových, nebo hmotnostních procentech. Je to příspěvek určité složky k vlastnostem celého kompozitu. Koncentrace je obecně považována za nejdůležitější parametr ovlivňující vlastnosti kompozitu. Je důležité, aby v systému nebyly žádné nehomogenity, protože se pak zhoršují vlastnosti celého systému, jelikož jsou dány nejslabším článkem a díky nehomogenitě zde může dojít k nepříznivému ovlivnění celkových vlastností.
- *Orientaci*, kdy vyztužení ovlivňuje izotropii systému. Pokud má vyztužovací částice tvar s rozměry ve všech směrech přibližně stejný, pak se kompozit chová v podstatě jako izotropní materiál, jehož vlastnosti jsou ve všech směrech stejné. Pokud je výztuž vláknité povahy, tak systém vykazuje anizotropní chování.

Výztuže také můžeme dělit podle tvaru na [5; 28]:

- *Částicové* jsou výztuže ve formě různých prášků s částicemi různých velikostí i tvarů (kulovité, jehlancovité, destičkovité atp.). Jako částicová výztuž, též zvaná plnivo, se používají zejména prášky různých anorganických sloučenin jako např. MgO, Zn₂O,

ZrO₂, SiC, TiC, Si₃N₄, ZrB₂. Dále se také používá slída, kaolín, jíl, mletá skleněná vlákna, dřevná moučka či kuličky skla.

- *Vláknové* jsou výztuže ve formě krátkých, nebo nekonečně dlouhých vláken, nebo vláknových monokrystalů (tzv. whiskerů). Vlákna jsou pevnější než matrice a jejich pevnost závisí zejména na průřezu vlákna. Pevnost vlákna roste se snižujícím se průměrem. Pevnost vláken je nižší než teoretická zejména kvůli vzniku trhlin na povrchu.

1.1.2.1 Vláknové výztuže

Pro vyztužení matric je k dispozici široké spektrum vláken, které se dále rozšiřuje. Vlákna mohou být přírodní (bavlna, celulóza), kovová a slitinová (ocel, chrom, molybden, hliník, slitiny titanu, wolfram), keramická, uhlíková, skleněná, minerální a v neposlední řadě polymerní (aramid, vysokomodulový PE atd.). [1]

Vlákna mají za úkol zejména zlepšit mechanické vlastnosti matrice, nikdy však nemůžeme dosáhnout teoretických hodnot tvrdosti. Velmi důležitý je zde tzv. synergický efekt mezi matricí a vlákny. To nám umožňuje konstruovat kompozity s vysokou pevností a tuhostí přesahující vše, co kdy bylo dosaženo úpravou tradičních víceméně homogenních materiálů. Vláknoem vyztužené kompozity zaujímají velmi důležité místo v mnoha konstrukčních odvětvích, ať je to automobilový průmysl, letectví, kosmonautika nebo mnoho dalších. [1; 28]

1.1.2.1.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna jsou jedny z nejpoužívanějších pro výrobu kompozitů, vyrábí se z taveniny tažením rychlostí až 50 m/s. Složení taveniny závisí na druhu vyráběného skla, pro kompozity se nejčastěji používají E-sklo (E-electric) a R-sklo (R-resistance), v Americe nazývané S-sklo (S-strength). Pokud je vyžadován vysoký modul, je možno použít speciální M-sklo obsahujícího mnoho oxidů. Mezi další vyráběné skloviny patří C-sklo, které je odolné proti kyselinám a chemicky agresivním látkám, dále se vyrábí taky vysoce chemicky odolné bezborité sklo, které je nazváno ECR-sklo (ECR-Electric/Chemical-resistance). ECR-sklo je využíváno hlavně v elektrotechnice. Směs na výrobu E-skla se skládá z 54,5 % SiO₂, 14,5 % Al₂O₃, 17 % CaO, 4,5 % MgO, 8,5 % B₂O₃ a 0,5 % NaO. Směs pro výrobu R-skla je 64 % SiO₂, 26 % Al₂O₃, 10 % MgO. U obou směsí se jedná o hmotnostní procento zastoupení složky ve směsi. [1; 3; 4]

Skelná vlákna se používají do kompozitů v mnoha různých podobách, základní jsou pramence (tzv. roving), rohož, tkanina z pramenců, popř. jemnější tkanina z vláken. Tyto druhy

jsou využívány hlavně pro kompozitní materiály, jež mají reaktoplastickou matici. V kompozitech s termoplastickou maticí se používají prioritně krátká sekaná vlákna přibližné délky 0,22 mm, popř. dlouhá vlákna s délkou okolo 5 mm. [3; 4]

Pramence se skládají z 20 až 120 konců (běžně okolo 60), což jsou rovnoběžně uložená nestočená vlákna. Zpracovávají se buď sekáním, tkaním, nebo navíjením, lze z nich také dělat tzv. prepregy, kdy jsou pramence naimpregnovány tenkou vrstvou reaktoplastické pryskyřice. Tyto prepregy jsou pak nastříhány a vytvarovány do potřebného tvaru a vytvrzeny do finálního tvaru. [1; 3; 4]

Rohože ze sekaných pramenců jsou netkané plošné výrobky, které mají plošnou hustotu od 300 do 900 g/m². Rohože se vyrábí vrstvením skelné stříže o délce vláken okolo 50 mm (popř. až 70 mm) na jedoucí pás, poté je nanášeno pojivo a rohož projede pásovou sušárnou, kde pojivo zatuhne a výsledná rohož je pak navíjena do rolí. Jejich použití je hlavně pro lisování, ruční laminování a lze je použít i pro vakuovou infúzi. Orientace vláken ve výsledném kompozitu je nahodilá. [3; 28; 29]

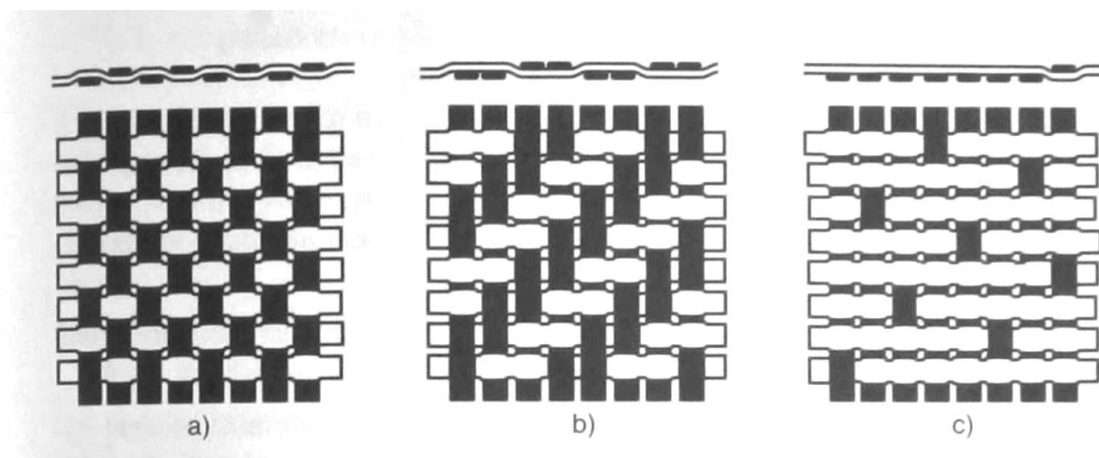
Rohože z kontinuálních vláken jsou netkané plošné výrobky, které se vyrábějí obdobně jako rohože ze sekaných pramenců, ovšem jsou zde použity nekonečně dlouhá vlákna (zpravidla 25-50 tex). Orientace vláken je stejně jako u rohože ze sekaných pramenců nahodilá. Jejich výhoda je hlavně v lepší tvarovatelnosti a také zvýšení mechanických vlastností. Z jejich pomoci lze také vytvářet kompozity o vyšším obsahu skelné výztuže než u rohože ze sekaných pramenců. [3; 29; 30]

Krátká vlákna jsou mletá skelná vlákna rozptýlená až na elementární vlákna, která se používají zejména jako plniva termoplastů, které se následně zpracovávají zejména vstřikováním, popř. tlakovým formováním. Délka vláken je do 25 mm a jsou orientována buď náhodně, nebo závislá na toku taveniny ve formě. Tato krátká vlákna nedodávají výslednému výrobku žádné mechanické vlastnosti a mají čistě charakter plniva (zejména u polyolefinů). [3; 4; 28]

Skelné tkaniny jsou plošné tkané výrobky z vláken (skané příze), či pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově. Vyztužení je zde v obou směrech, zvýšením počtu vláken v osnově docílíme rozdílných typů křížení vláken, tím vznikají různé vazby. Hmotnost vláken lze ve vazbě měnit až v poměru 1:20, čímž vznikají kordy. Tkaniny jsou snáze zpracovatelné než rohože, či pramence, potažmo prepregy. [3; 4]

Hlavní druhy vazeb jsou:

- *Plátňová vazba*: nejjednodušší typ vazby, kdy každý útek jde přes a pod jednou osnovou a taktéž každá osnova jde přes a pod jedním útkem (Obrázek 20a). Vazba má dobrou rozměrovou stálost a malý otřep při řezání. [3; 31]
- *Keprová vazba*: druhý nejjednodušší typ vazby, kdy každý útek jde přes a pod dvěma, nebo více osnovami a opět pod a přes útky jde i osnova, kdy počet nemusí být stejný (Obrázek 20b). Pomocí keprové vazby je vytvářena převážná část tkanin z uhlíkových vláken. Tkanina je ohebnější než u tkaniny s plátňovou vazbou a jsou proto výhodnější na tvarované výrobky. [3; 31]
- *Atlasová vazba*: též nazývaná vazba saténová. Uspořádání útku a osnovy je zde poměrně složité a existuje mnoho typů, např. pětivazný útkový atlas (Obrázek 20c). Vychýlení vláken je zde menší, než u keprové vazby a má velmi dobrou tvarovatelnost, z čehož plyne jeho vhodnost pro použití u složitých prvků. Při použití atlasové tkaniny lze dosáhnout velmi hladkého povrchu. [3; 31]



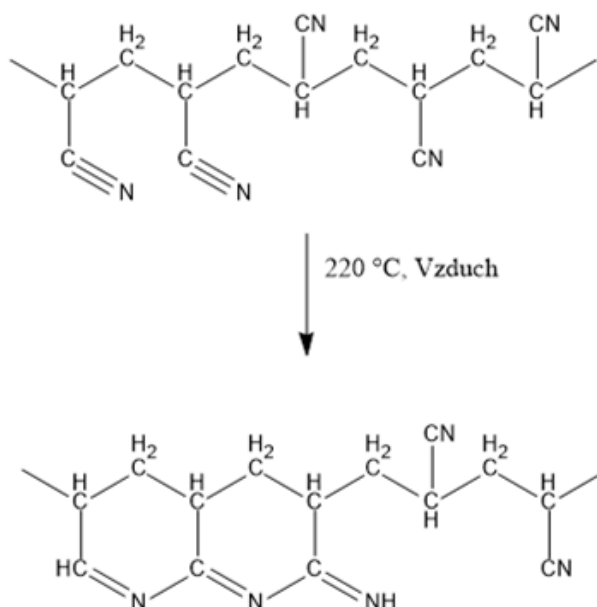
Obrázek 20: Typy vazeb u tkanin [3]

Tkaniny nemusí mít v útku a osnově stejnou skladbu vláken, může se lišit například počtem vláken v osnově, kde jich je podstatně více než v útku, takové tkaniny jsou vhodné pro aplikace, kde je potřeba dobrých mechanických vlastností pouze v jednom směru. Dále pak můžeme mít tzv. směsné tkaniny, kdy v útku a osnově jsou použity různé druhy vláken, zejména z důvodu ceny, kdy užité vlastnosti jsou potřeba pouze v jednom směru. Můžeme také vyrábět tzv. hybridní tkaniny, kdy je v tkanině použito více druhů vláken, za účelem využití jejich kladných vlastností, např., dobrá rázová houževnatost aramidových vláken s tuhostí vláken

uhlíkových, či mez pevnosti vláken skleněných. Každý systém je vhodnější pro jinou aplikaci, nejčastěji jsou používány při výrobě lodí, sportovního náčiní či letadel. Nejsou vhodná pro balistické využití, jelikož skleněná a uhlíková vlákna výrazně snižují vlastnosti aramidových vláken. [3; 32]

1.1.2.1.2 Uhlíková a grafitová vlákna

Uhlíková vlákna jsou v kompozitech používána zejména kvůli vynikajícím tahovým vlastnostem. Uhlíková vlákna lze vyrábět mnoha způsoby, jako první vyrobil uhlíkové vlákno již Edison, ovšem k rozmachu výroby došlo až kolem roku 1960, kdy se uhlíková vlákna vyráběla pyrolýzou viskózního hedvábí (regenerované celulózy). Velmi důležitá pak byla o pár let později výroba z polyakrylonitrilu (PAN), která je dnes nejrozšířenější. Pro výrobu uhlíkových, potažmo grafitových vláken, nelze použít běžný PAN, ale používá se tzv. SAF (special acrylic fiber). Výroba uhlíkových vláken se skládá ze 2 kroků – *preoxidace* a *karbonizace*. První krok probíhá v oxidační atmosféře při teplotě 200-300 °C, kdy polymerují postranní nitrilové skupiny, odštěpuje se voda a vznikají tak stabilní žebříčkové struktury (Obrázek 21). [4; 6]



Obrázek 21: Oxidace PAN

Původní bílé vlákno při procesu zčerná. Dalším krokem je karbonizace při 900-1600 °C, kde odštěpuje se HCN a CO₂. Obsah uhlíku ve vláknech po karbonizaci je až 95 %. V případě potřeby výroby vysokomodulových vláken probíhá ještě třetí krok a tím je *grafitizace* při teplotách až 3000 °C, kdy probíhá žhání a přeměny jsou podobné rekrystalizaci. Grafitová vlákna mají obsah uhlíku kolem 99 % a jsou vysoce orientovaná, což zapříčiňuje jejich vysoké moduly. Ovšem extrémní teploty používané při výrobě zapříčiňují také velmi vysokou cenu grafitových vláken, a proto se používají pouze pro speciální aplikace. Uhlíková vlákna lze průmyslově vyrábět i pyrolýzou dehtových a asfaltových smol zvláknovaných z taveniny. [1; 3; 6]

Mechanické vlastnosti uhlíkových a grafitových vláken se výrazně liší dle výrobce i prekurzoru. Vysokomodulová grafitová vlákna mohou dosahovat modulu až 1000 GPa, běžná uhlíková vlákna dosahují modulu od 200 do 375 GPa, vlákna vyráběná zvláknováním z ropné smoly dosahují modulu až 688 GPa. Pevnost vláken na délce 25 cm je nejvyšší u typu UHS (ultra high strength), kde dosahuje až 2,97 GPa, taktéž mají nejvyšší prodloužení, které je až 1,27 %, běžná vlákna mají do 1 %, vysokomodulová grafitová vlákna mají dokonce pod 0,4 %. Pevnost ostatních vláken se dle typu pohybuje od 1,8 GPa do 2,2 GPa, pro vlákna vyrobeny z asfaltové smoly je to lehce přes 2 GPa. Grafitová vlákna mají též velmi dobrou tepelnou vodivost, která dosahuje 140 W/mK, což je více než některé kovy, pro představu železo má 80,2 W/mK. Do kompozitů se též používají speciální uhlíkové nanotrubičky, které zvládnou např. spolu s PC vytvořit elektricky vodivý kompozit. [1; 4; 24]

1.1.2.1.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF) se využívají v kompozitech zejména díky své vysoké pevnosti a tuhosti, za kterou vděčí aromatickým jádrům ve svém řetězci a vodíkovým můstkům mezi molekulami. Hlavními typy AF využívaných nejen v kompozitech jsou Nomex [poly(m-fenylenisoftalamid)] a Kevlar [poly(p-fenylentereftalamid)]. Nomex a Kevlar jsou obchodní názvy firmy DuPont, která tyto polymery vyrábí. Molekuly monomerů jsou propojeny amidovou skupinou. [3; 4; 7]

Nomex se vyrábí emulzní polykondenzací roztoku dichloridu kyseliny isoftalové v tetrahydrofuranu s roztokem m-fenylendiaminu v 5 až 10 % roztoku Na₂CO₃. Lze jej také připravit polykondenzací obou monomerů v dimethylacetamidu při -10 °C. Kevlar se vyrábí reakcí p-fenylendiaminu a dichloridu kyseliny tereftalové v prostředí směsi hexamethylfosforamidu a N-methylpyrrolidonu v poměru 2:1 při -10 °C. [7]

Nomex se zvlákňuje suchým i mokrým způsobem z roztoku, který získáme po syntézní reakci, musí se ovšem neutralizovat vzniklý chlorovodík anorganickou bází (LiOH, CaO). Neutralizace se provádí z důvodu ochrany výrobního zařízení proti korozi. Nelze jej zvlákňovat z taveniny, jelikož se dříve rozkládá. Kevlar se zvlákňuje z vysokoviskozního 20 % roztoku v koncentrované kyselině sírové. Jednotlivé elementární vlákna se spojují a mnohonásobně propírají, neutralizují a opatřují se tzv. aviváží, což je pomocný textilní prostředek pro zlepšení kluzných a mechanických vlastností. [3; 7]

Aramidová vlákna se vyznačují zejména výbornou tepelnou odolností ve srovnání s běžnými polymerními vlákny jako PE, PA 6, PA 66. Rozklad Kevlaru nastává přibližně při 450 °C, Nomexu pak při 370 °C. Jejich velkou výhodou je udržení jejich výborných tahových vlastností i při vysokých teplotách, Nomex má při 250 °C stále 60 % své původní pevnosti v tahu, Kevlar má o něco více. Pevnost v tahu za normální teploty je 3,45 GPa pro Kevlar a 3 GPa pro Nomex. Modul pružnosti v tahu má Nomex téměř dvakrát vyšší a to 125 GPa oproti 68,6 GPa, které má Kevlar. Protahování Kevlaru se pohybuje okolo 2,5 %, Nomexu pak 1,5 %. Jejich nespornou výhodou je nízká hustota oproti ostatním vyztužujícím vláknům. Hustota Kevlaru je 1,44 g/cm³. Jejich nevýhodou je vysoká nasákavost ve vodě, která je až 7 %, což ovlivňuje adhezi matrice na vlákna, a proto se vlákna musí před použitím vysušet (20 min při 120 °C). Kvůli benzenovým jádrům jsou také silně ovlivněna UV zářením, které výrazně snižuje jejich pevnost. Mají malou adhezi zejména k pryskyřicím, a proto se musí jejich povrch před použitím v kompozitu upravit. [1; 3; 4; 5; 11; 33]

Nomex se používá jako tepelně a hydrolyticky odolný filtrační materiál, pro nehořlavé oděvy a zejména pro výrobu elektroizolačního papíru potíraného polyimidovým lakem. Tento materiál se používá pro izolace při vysokých teplotách (nad 180 °C). V kompozitech se o mnoho více používá Kevlar. [7; 34]

Kevlar se používá pro bezazbestové spojkové obložení pro automobily, proti dříve používaným azbestovým třecím materiálům má o 70 % delší životnost. Jako nekonečná vlákna se používají zejména pro vyztužování pneumatik, hadic, dopravních pásů, kabelů a řemenů. Velmi důležité je použití pro balistické účely, tkaniny pro neprůstřelné vesty a kompozity pro lehká obrněná vozidla. Pro kompozity se používají jako matrice zejména PA, PC, PTFE, epoxidy a fenolické pryskyřice, kdy získáme materiály s vysokou tepelnou odolností, odolností proti abrazi a s mimořádnou vrubovou houževnatostí. Kompozity vyztužené AF se velmi špatně obrábějí. [3; 7; 34]

1.1.2.2 Částicové výztuže

Částice je definována jako nevlákněný útvar, který nemá žádný dlouhý rozměr. Částice v kompozitech nepřispívají mnoho ke zvýšení mechanických vlastností (např. lomu). Avšak částice kaučukovité povahy výrazně zlepšují ve velmi křehkých polymerních materiálech odolnost lomu. Důležitými typy využívaných částic jsou keramické, kovové a anorganické částice, které mají v kovových maticích různé mechanismy vyztužení. Částice se také podílejí na přenášení napětí, ovšem ve velmi malém rozsahu oproti vláknům. Částicové výztuže jsou však zejména využívány ke zlepšení vlastností matrice jako je např. odolnost proti abrazi, úprava tepelné a elektrické vodivosti, zlepšení chování při vyšších teplotách, útlum vibrací a další. Velmi často se používají pouze jako plniva za účelem snížení ceny výsledného výrobku. Orientace částic ve výrobku může být náhodná, nebo přednostně orientovaná, což ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti. [6; 28]

Mezi částicové výztuže se řadí:

- Anorganická plniva
- Organická plniva
- Polymerní plniva

1.1.2.2.1 Anorganická plniva

Jsou nejvyužívanější skupinou částicových plniv. Většinou se jedná o látky, jejichž částice mají rozměry v nanometrech, poté mluvíme o kompozitu plněném těmito plnivou jako o nanokompozitu. Jejich funkce je buď čistě jako plnivo např. ke zlevnění finálního výrobku, nebo jako vyztužující, což se projevuje zvýšeným odporem proti působení nevratných plastických deformací. Dojde ke zvýšení meze kluzu, pevnosti a tvrdosti, ale poklesu houževnatosti. Účinkem velmi jemných částic (méně než 200 nm) dochází ke zpevnění disperznímu. Jsou-li částice větší než 1 mikrometr, tak mluvíme o zpevnění samotnými částicemi. [1; 5]

Mezi anorganická plniva patří různé oxidy (Al_2O_3 , TiO_2 , CrO_2 , ThO_2 , Y_2O_3 , CeO_2 ad.), karbidy (karbid wolframu a titanu) hojně používané v cermetech, nitridy (Si_3N_4), dále pak různé upravené jíly, kaolín, mletá skleněná vlákna, saze, křemenná moučka a mnohé další. Používají se pro všechny druhy matic, např. cermety jsou rozptýlené karbidy různých kovů v keramické matici, nebo mletý porcelán v polyesterových pryskyřicích, který zlevní výrobek a může také snížit objemové smrštění a zneprůhlednit výrobky. Pro kovové matrice se až na pár výjimek používají oxidy kovů. [1; 5; 7]

1.2 Sklolamináty

Jsou kompozitní materiály, u kterých jsou jako výztuž použita skelná vlákna a jako matrice se nejčastěji využívá reaktoplastických pryskyřic jako nenasyčené polyesterové pryskyřice a epoxidové pryskyřice. Laminát pochází z latinského slova lamina, což znamená vrstva. Sklolaminát je tedy kompozit ve tvaru plošného výrobku, u kterého lze odlišit jednotlivé vrstvy, které se skládají ze skleněné výztuže a vytvrzené reaktivní pryskyřice. Jednosměrný laminát má vlákna orientovaná pouze v jednom směru, vícevrstvý laminát pak má vlákna orientována v různých směrech, nebo má na sobě více jednosměrných vrstev. [3]

Prvotní velké uplatnění sklolaminátů přichází během druhé světové války, v roce 1942 můžeme najít první zmínky o aplikacích sklolaminátů pro výrobu letadel a lodí. Velký rozmach v používání sklolaminátů přišel v 50. a 60. letech minulého století, bylo vyvinuto mnoho nových systémů pro různé aplikace. Dnes jsou používány v leteckém, automobilovém, v chemickém a elektrotechnickém průmyslu, nebo na výrobu sportovního a spotřebního zboží. [3; 6]

1.3 Technologie výroby laminátů

Výsledné výrobky můžeme vytvářet různými metodami i z různě předpřipravených materiálů. Jako základní materiály se používají vlákenné materiály ať již ve formě pramenců, tkanin nebo rohoží. Jako matrice používáme hlavně reaktoplastické pryskyřice, zejména UP a EP. Dále se dají použít prepregy pro lepší manipulaci, nebo tvarovky, kdy již máme udaný tvar výrobku a nemáme tak vysoké ztráty při ořezu. [3; 6]

Pracovní postupy můžeme dělit na:

- manuální
- částečně automatizované
- zcela automatizované
- kontinuální
- zvláštní

Mezi metody výroby laminátů patří ruční kladení, lisování za tepla a za studena, navíjení, tažení, odstředivé lití, strojní stříkání, vakuová infúze a mnoho dalších. U různých metod lze dosáhnout různých kvalit povrchu, různého obsahu výztuže a lze jimi vyrobit různě tvarované výrobky. Při volbě technologie hraje velkou roli také ekonomické zatížení a sériovost výrobku. Následuje popis pro tuto práci nejdůležitějších technologií, kterými jsou ruční kladení, lisování a vakuová infúze. [6]

1.3.1 Ruční kladení

Ruční kladení je nejjednodušší způsob výroby, který je vhodný pro malou sériovou výrobu, prototypy nebo velkoplošné díly. Je to nejstarší metoda používaná pro tvorbu sklolaminátů. I když je to, co se postupu a zařízení týče jednoduchý způsob, tak kvalita výsledného výrobku velmi závisí na zručnosti a zkušenostech operátora. Výrobky vyrobené touto metodou jsou taky cenově příznivější než ty vyrobené ostatními metodami. [3; 6; 35]

Ruční kladení probíhá na pozitivní, nebo do negativní formy. První se nanese vrstva separátoru, aby bylo možné výrobek z formy sundat, poté se natře první vrstva pryskyřice zvaná gelcoat. Gelcoat má tloušťku 0,3-0,6 mm a zabraňuje prorážení výztuže na povrch a slouží jako ochrana povrchu, popř. může být dobarvena pro lepší vzhled povrchu. Na gelcoat se položí vrstva tkaniny a nanese další vrstva pryskyřice pomocí stěrky, štětce, válečku, nebo může být nanášena stříkací pistolí. Je důležité zbavit se co nejvíce bublin vzduchu, které způsobují mikrovruby, které se projeví zhoršením mechanických vlastností. Při ručním kladení je téměř nemožné zbavit se všech bublin. Nanášení pryskyřice a prokládání tkaniny, nebo rohože se provádí, dokud nemáme požadovaný počet vrstev. Tento způsob se jmenuje kladení za mokra. Obsah výztuže ve výsledném výrobku je kolem 35 hm. % při použití rohoží až 45 hm. % při použití skleněných tkanin. [3; 6]

1.3.2 Lisování

Lze ho v principu rozdělit na lisování za tepla a na lisování za studena. Používanější je lisování za tepla, jelikož teplo urychluje vytvrzovací reakce, a tudíž je čas potřebný k vyrobení jednoho kusu nižší. Lisy mohou být manuální, poloautomatické, nebo také plně automatické, jejich nevýhodou je ale velmi vysoká pořizovací cena a vyplatí se tedy pouze, pokud se nemusí často měnit forma a výroba na něm jede minimálně v trojsměnném provozu. [3]

Lisování za studena

Lisování probíhá bez přívodu tepla při teplotě od 30 do 60 °C. Do lisovací formy vložíme vrstvy výztuže, nalijeme pryskyřici a lis uzavřeme uzavíracím tlakem 0,1-1 MPa. Pokud chceme usnadnit vládání materiálu do forem, tak můžeme využít tzv. tvarovky, kdy již dopředu máme tkaninu naimpregnovanou do tvaru budoucího výrobku. U lisování za studena se pro výrobu forem využívají levné materiály jako lamináty, dřevo, plech. Lisování za studena je vhodné, pokud potřebujeme výrobek s oboustranně hladkým povrchem. Technologie je vhodná pouze pro matrice s velmi krátkým časem vytvrzování za nižších teplot. Je vhodné spíše pro malou sériovost. [3; 6]

Lisování za tepla

Při lisování je forma zahřívána na vyšší teploty, běžně okolo 150 °C, u epoxidů i 200 °C. Lze zde vkládat klasicky tkaninu a pryskyřici, ovšem výhodnější je použití tvarovek, ale zejména prepregů. Pro prepregy se běžně používají lisy s krátkým zdvihem. Lisovací tlaky jsou vyšší než u lisování za studena, běžně 2 MPa. Formy jsou ocelové a musí být leštěné, nebo tvrdě chromované. Vytápění je převážně elektricky odporové. Je to vysoce produktivní metoda schopná vytvořit výrobek v řádech desítek sekund. [3; 6]

1.3.3 Vakuová infuze

Vakuová infuze je poměrně nová metoda, kdy k prosycování tkaniny používáme vakuum, jehož hodnota se liší dle metody. Tlak při dávkování pryskyřice bývá normální atmosférický, ovšem u některých metod může být i přetlak. Mezi základní typy patří vakuové prosycování s pružnou vrchní částí formy, vakuové prosycování pod pružnou folií a SCRIMP (Seeman's composite resin infusion molding). [15; 36; 37]

- *Vakuové prosycování s pružnou částí vrchní formy* je druh infuze, kdy je spodní forma tuhá s odsávacími kanálky a vrchní část má určitou pružnost, která reguluje přítlak a uzavírací sílu. Prosycování je pak zajištěno vakuem 0,6-0,8 bar. Pojivo můžeme přivádět ze zásobníku, nebo jím můžeme prosytit tkaninu před uzavřením formy. Metoda je vhodná, pokud je potřeba výrobek hladký z obou stran.
- *Vakuové prosycování pod pružnou folií* je technologie podobná lisování za pomoci vakua, spodní forma je klasická jako pro ruční kladení. Horní část formy je pružná folie, která je k okrajům přilepena těsnicí páskou. Iniciované pojivo se nasává ze zásobníku a u rozměrných dílů si rozvádí kanálky. Vakuum je aplikováno na krajích formy formou kanálků.
- *SCRIMP* je patentovaná metoda výroby kompozitních materiálů, která má mnoho společného s prosycováním pod pružnou folií. Forma je ze spodní části tuhá a na ni se pokládá výztuž na kterou přijde odtrhová tkanina a na ni pak tkanina rozvodová, která se stará o prosycování výztuže a na povrch opět přijde vakuovací folie. Výsledný výrobek má pouze jednu stranu hladkou, proto je její využití hlavně u výrobku, kdy jde výrobek vidět pouze z jedné strany. Metoda je vhodná i pro velmi velké výrobky nesložitého tvaru, používá se zejména při vytváření trupu lodí (Obrázek 22), letadel, vagonů vlaků a dalších. Pro metodu SCRIMP jsou použitelné téměř všechny druhy vláken v různých tkaninách, zejména skelná, aramidová, uhlíková. Jako matrice není

dobré používat vysoce viskózní pryskyřice, protože by u nich nemuselo dojít k prosycení. Je také důležité volit systém s takovým vytvrzovacím časem, aby se stihla prosytit celá výztuž. Tato práce využívá metodu SCRIMP pro výrobu vzorků pro měření mechanických vlastností kompozitů.[36; 37]



Obrázek 22: Část lodi vyráběná metodou SCRIMP [37]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Charakterizace materiálů

CHS-EPOXY 520

Nízkomolekulární kapalná nemodifikovaná epoxidová pryskyřice na bázi bisfenolu A, která může být vytvrzována při normální, nebo zvýšené teplotě od společnosti Spolchemie Ústí nad Labem. (Tabulka 1)

Tabulka 1: Vlastnosti CHS Epoxy 520

Parametr	Datasheet	Naměřeno
Epoxidový hmotnostní ekvivalent	182-192 g/mol	-
Epoxidový index	5,208-5,495 mol/kg	5,36 mol/kg
Snadno zmýdelnitelný chlor	max. 0,03 %	-
Netěkavé látka (2h/140 °C)	min. 99,5 %	-
Viskozita (25 °C)	12-14,5 Pas	15,4 Pas

CHS-EPOXY 501

Nízkomolekulární kapalná epoxidová pryskyřice na bázi bisfenolu A a bisfenolu F modifikovaná monofunkčním rozpouštědlem od společnosti Spolchemie Ústí nad Labem. (Tabulka 2)

Tabulka 2: Vlastnosti CHS Epoxy 501

Parametr	Datasheet	Naměřeno
Epoxidový hmotnostní ekvivalent	188-200 g/mol	-
Epoxidový index	5-5,3 mol/kg	5,36 mol/kg
Snadno zmýdelnitelný chlor	max. 0,01 %	-
Viskozita (25 °C)	0,6-0,8 Pas	0,86 Pas

Telalit 590

Tvrdidlo na bázi primárních polyetheraminů od společnosti Spolchemie Ústí nad Labem. (Tabulka 3)

Tabulka 3: Vlastnosti tvrdidla Telalit 590

Parametr	Datasheet	Naměřeno
Aminové číslo	440-490 mg KOH/g	419 mg KOH/g
Viskozita	5-10 mPas	-
Vodíkový Ekvivalent	min. 59 g/mol	-

Telalit 420

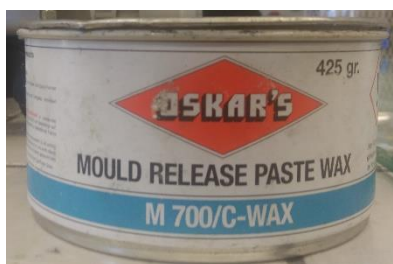
Optimálně modifikovaná směs cykloalifatických polyaminů od společnosti Spolchemie Ústí nad Labem. (Tabulka 4)

Tabulka 4: Vlastnosti tvrdidla Telalit 420

Parametr	Datasheet	Naměřeno
Aminové číslo	600-650 mg KOH/g	584 mg KOH/g
Viskozita	10-25 mPas	-
Vodíkový Ekvivalent	min. 42,5 g/mol	-

Separční vosk Oskar's M 700/C-Wax

Tuhá emulze čistého karnaubského vosku v uhlovodíkových rozpouštědlech a vodě. Neobsahuje silikony. Používá se pro separaci skleněné formy. Dodává ho firma Havel-Composites.(Obrázek 23) [38]



Obrázek 23: Separční vosk

Použité tkaniny a doplňky pro vakuovou infúzi

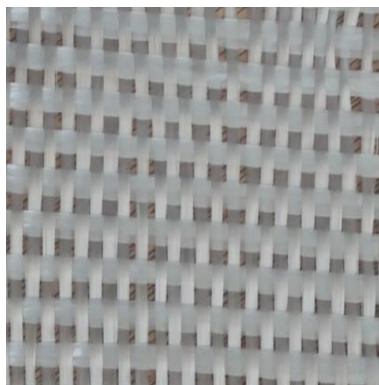
- *Pro kompozity:*

Netkaná rohož o plošné hustotě 450 g/m² od firmy Owens Corning v Toledo (USA). (Obrázek 24)



Obrázek 24: Netkaná rohož

Tkaná tkanina o plošné hustotě 600 g/m² od firmy Owens Corning v Toledo (USA).(Obrázek 25)



Obrázek 25: Tkaná textilie

- *Pro vakuovou infúzi:*

Nylonová odtrhová tkanina o plošné hustotě 83 g/m². Kvalitní odtrhová tkanina odolávající teplotě až 200 °C. Od firmy Havel-Composites. (Obrázek 26) [39]



Obrázek 26: Nylonová odtrhová tkanina

Středně silná rozvodová tkanina o plošné hustotě 200 g/m² od firmy Havel-Composites. [39]



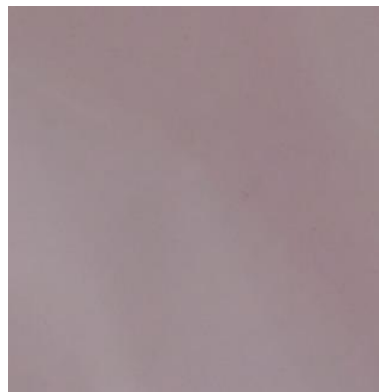
Obrázek 27: Rozvodová tkanina

SeparáčnÍ folie od firmy Havel-Composites. (Obrázek 28) [39]



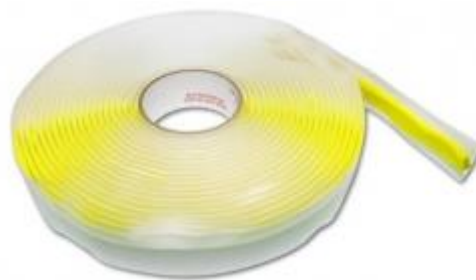
Obrázek 28: SeparáčnÍ folie

VakuovacÍ folie od společnosti Havel-Composites. (Obrázek 29) [39]



Obrázek 29: VakuovacÍ folie

Páska AT-200Y ze syntetického kaučuku od společnosti Airtech, Huntington Beach (USA).
Používaná pro těsný spoj mezi vakuovacÍ folií a sklem. (Obrázek 30)



Obrázek 30: Těsnící páska AT-200Y [40]

2.2 Zařízení pro vakuovou infúzi

Zařízení pro vakuovou infúzi se skládá:

- z vakuové pumpy od firmy Value® (Obrázek 31)



Obrázek 31: Vakuová pumpa [41]

- vakuového rezervoáru RB 451 od firmy Airtech, Huntington Beach (USA) (Obrázek 32), jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 5.

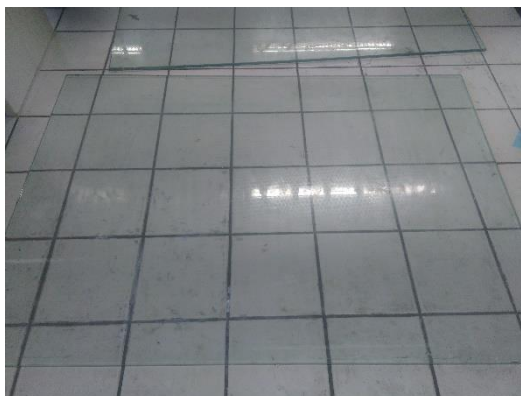


Obrázek 32: Vakuový rezervoár RB 451

Tabulka 5: Technické parametry rezervoáru RB 451 [40]

Objem rezervoáru	10 litů
Průměr rezervoáru	30 cm
Výška rezervoáru	46 cm
Vstupní ventil vakua	3,8 palce
Vstupní ventil pryskyřice	1/2 palce, nebo 5/8 palce
Maximální teplota	50 °C

- kaleného skla o rozměrech 120 na 60 cm. (Obrázek 33)



Obrázek 33: Skleněný základ formy

2.3 Příprava vzorků

Výroba proběhla na ústavu výrobního inženýrství fakulty technologické na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně.

Nejprve byla omyta skleněná plocha o rozměrech 120 na 60 cm. Poté byl prostor uprostřed formy o rozměrech přibližně 90 na 45 cm naseparovaný pomocí separačního vosku, poté co zaschnul byl vyleštěn pomocí papírové utěrky a znova naseparován. Separace a leštění bylo provedeno celkově třikrát. Mezitím byly připraveny tkaniny, jak již výztuž kompozitního materiálu, tak i pomocné tkaniny pro infuzi. Pro kompozit z netkané textilie byly zvoleny 4 vrstvy, pro tkanou textilií pak 5 o rozměru 90 na 45 cm. Počet vrstev byl volen dle experimentu, kdy byla prosycena jedna vrstva výztuže a po vytvrzení byla změřena její výška. Výsledné desky se díky tomu pohybovali ve stanoveném rozmezí do 5mm, přičemž tloušťka byla okolo 25 mm. Pomocné tkaniny pro vakuovou infúzi byly stříhány na větší rozměr z důvodu lepšího odvodu přebytečné pryskyřice. Jakmile byla forma naseparovaná tak byla nejprve vložena skelná výztuž (Obrázek 34) na tu poté byla vložena modrá separační folie (Obrázek 35) na kterou následovala nylonová odtrhová tkanina (Obrázek 36). Jako poslední tkanina byla vložena zelená rozvodová tkanina, která má za úkol rozvádět pryskyřici ve formě a přebytečnou pryskyřici odvézt ke vstupu vakua, aby odtekla.



Obrázek 34: Založení tkaniny do formy



Obrázek 35: Skládání formy – separační folie

Jako další krok byly připraveny vtoky epoxidu, rozvod ve formě zajišťovaly dvě spirálovité hadice, které byly pomocí 90° odbočky napojeny na hadici z LDPE, která byla vyvedena mimo skleněnou formu a sloužila pro nasávání pryskyřice ze zásobníku (Obrázek 37). Jeden vtok byl umístěn v levé části formy a jeden uprostřed, bylo to z důvodu snadnější distribuce pryskyřice, kdy se nejprve nasávala vstupem dále od vakua a poté vstupem uprostřed.



Obrázek 36: Skládání formy – odtrhová tkanina



Obrázek 37: Skládání formy – rozvodová tkanina se vtoky a vstupem vakua

Hadice z LDPE byla připevněna ke sklu pomocí oboustranné lepicí pásky. Poté bylo připraveno místo, kde byla lepena vakuová folie, aby bylo dosaženo co nejvyšší těsnosti. Nejprve byl přilepen delší kousek pásky pod hadici (Obrázek 38) a poté byla hadice oblepena páskou tak, že vzniknul jakoby tvar písmena omega (Obrázek 39). Poté byl do pravé části formy připraven vstup vakua, který byl opět ze spirálovité hadice, která byla přes koleno napojena na LDPE hadici, která vedla do 90° odbočky, ta byla připojena k vakuovému rezervoáru a byla k ní obdobně připojena i druhá vakuovací forma (Obrázek 45). Spirálovitá hadice na přívod

vakua musela ležet na odtrhové tkanině, která přesahovala samotnou skelnou tkaninu, díky tomu se mohl odsávat vzduch a přebytečná pryskyřice z tkaniny.

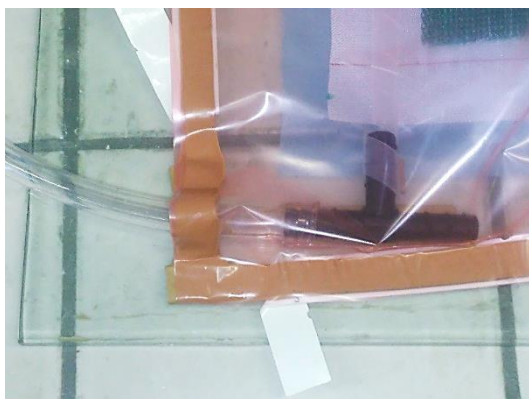


Obrázek 38: Skládání formy – příprava vtoku(1.část)



Obrázek 39: Skládání formy – příprava vtoku (2.část)

Následovala příprava vakuovací folie, jejíž rozměry byly asi o 30 % větší než rozměry odtrhové tkaniny a separační folie z toho důvodu, že se musela „zkrabatět“, aby bylo docíleno rozvodu pryskyřice a odvodu vzduchu. Poté byla na okraje folie nalepena oboustranná lepicí páska, která byla z jedné strany chráněna, takto připravená folie byla poté položena na formu a pomalu se započala lepit ke sklu.



Obrázek 40: Skládání formy – lepení rohu se vstupem



Obrázek 41: Skládání formy – tvoření „výstupků“

Folie se začala lepit u rohů, nejlépe od rohu se vstupem vakua. Folie nesměla být napnutá, musela být dostatečně volná, aby se dali vytvořit na krajích pomocí pásky „výstupky“ (Obrázek 41), které zapříčiní „zkrabatění“ folie.

Jakmile byly přilepeny rohy, tak byly lepeny strany, kdy na každé straně byly vytvářeny „výstupky“, na dlouhých stranách vycházely asi 4, na kratších 2 (Obrázek 42). Jakmile byly všechny strany přilepeny, tak bylo důležité pořádně všude dotlačit pásku, zejména v rozích a v místech vtoků pryskyřice a vstupu vakua. Při celém procesu se muselo dbát na to, aby se folie neprotrhla, to by zapříčinilo povolení vakua.

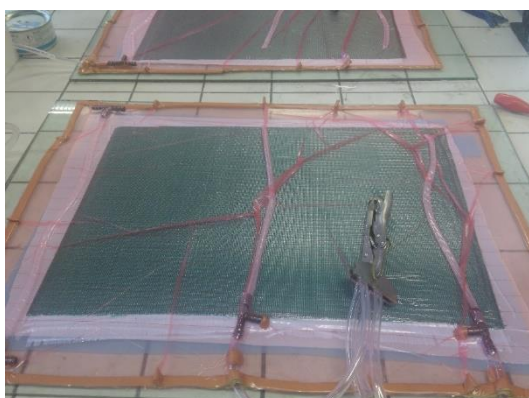


Obrázek 42: Skládání formy – lepení vakuovací folie



Obrázek 43: Nezavakuovaná forma

Jakmile byla forma řádně připravena, tak se připevnilы svírací kleště na obě LDPE hadice sloužící jako vstupy (Obrázek 43), aby bylo zabráněno úniku vakua a forma byla zavakuována, podtlak byl 0,8-1 bar. Bylo důležité zkontrolovat všechny netěsnosti kudy vnikal do formy vzduch a jakmile byla forma zkontrolována, tak byla pomocí kleští sepnuta hadice pro vstup vakua a čekalo se 15 minut, zda se do formy nedostane vzduch (Obrázek 44). Mezitím byla připravena směs pryskyřice a tvrdidla dle přesných poměrů, která byla dokonale homogenizována, aby nedošlo k vysrážení tvrdidla, či pryskyřice na povrch desky.



Obrázek 44: Zavakuovaná forma

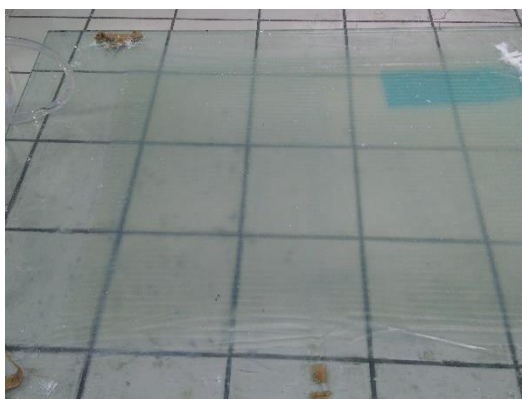


Obrázek 45: Vakuová infuze na 2 formách

Poté, co byla připravena směs a bylo ověřeno, že forma těsní, byl odjištěn z kleští první vtok a hadice byla ponořena do pryskyřice. Jakmile se pryskyřice dostala až do oblasti 2. vtoku, byla hadice přehnuta a opět zajištěna kleštěmi. Druhý vtok byl z kleští vyndán a bylo pokračováno v nasávání pryskyřice z nádoby, dokud nedošlo k dokonalému prosycení tkaniny. Prosycenost tkaniny bylo možno kontrolovat pohledem zespod skrze sklo. Jakmile byla tkanina prosycena, tak byla vyndána z nádoby vtoková hadice a byla přicvaknuta zpět do kleští. Jelikož byly dělány zároveň 2 formy, tak byl celý proces prosycování zopakován i pro druhý typ tkaniny.

Poté bylo udržováno vakuum, které z tkaniny odsávalo vzduch a přebytečnou pryskyřici. Jakmile došlo k částečnému zatuhnutí, nebo zvýšení viskozity na tolik, že vakuum již neodsávalo pryskyřici byla hadice pro vstup vakua uzavřena kleštěmi. A výsledný kompozit byl nechán vytvrdit přes noc ve formě.

Ráno byla odlepena vakuovací folie a pomocí odtrhové tkaniny byly sundány pomocné textilie pro vakuovou infuzi a separační folie. Pomocí špachtle byla oddělena výsledná kompozitní deska od skla, které bylo naseparováno voskem (Obrázek 46).



Obrázek 46: Odformovaná deska

Desky poté byly rozřezány na polovinu a dotvrzeny v sušárně při 80 °C po dobu 4 hodin. Dotvrzené desky byly nařezány pomocí vodního paprsku (Obrázek 47) ve společnosti Synpo, a.s v Pardubicích, protože řezání desky klasickým kotoučem by roztřepilo tkaninu, dále by došlo k rychlému otupení kotouče, a navíc by byl problém s vdechováním částic skelné výztuže. K řezání bylo použito zařízení od společnosti OMAX a jako abrazivum byl použit australský granát. Na tahové zkoušky bylo řezáno těleso dle normy ČSN EN ISO 527-4 typ tělesa 1B. Pro ohybovou zkoušku bylo nařezáno těleso o rozměrech 60 na 10 mm, pro rázovou houževnatost pak 50 na 6 mm.



Obrázek 47: Řezačka vodním paprskem



Obrázek 48: Křehký systém CHS epoxy 520 a Telalit 420

Problémy, které nastali při přípravě vzorků

Při vakuové infuzi se u systému CHS epoxy 501 a Telalit 590 u formy se tkanou textilií protrhla vakuovací folie a jelikož se místo úniku nepodařilo najít došlo k povolení vakua a částečnému uvolnění tlaku na prosycenou tkaninu. A kvůli tomu, že systém měl dlouhý reakční čas a malou viskozitu došlo ke vzdálení tkanin od sebe. Výsledný kompozitní materiál v sobě měl mnoho prostoru vyplněného vzduchem, a tudíž jeho výsledky nelze pokládat za průkazné, jelikož touto chybou mohli být u některých zkoušek ovlivněny.

Při výrobě vzorku u systému CHS epoxy 520 a Telalit 420 nastal velký problém s odlepením desky od skleněné formy z důvodu extrémní křehkosti nedotvrzeného systému jak u tkané textilie, tak i rohože (Obrázek 48). Desku se ale podařilo ze skla sundat téměř celou a po dotvrzení v sušárně nenastaly žádné další problémy.

2.4 Metodika měření

Stanovení viskozity dle Höpplera

Viskozita byla měřena při teplotě 25 °C, které bylo docíleno vytemperováním přístroje na požadovanou teplotu. Kyveta byla naplněna po rysku a byla vložena do rheoviskozimetru. Jakmile byla měřená látka vytemperována proběhlo měření viskozity, kdy byla sledována dráha pádu skleněné kuličky (30 mm) a byl měřen čas. Čas musel být v intervalu 30 až 60 sekund. Měření bylo provedeno pro každý systém 5 krát (s intervalem 3 minuty), a poté byla vypočítána výsledná viskozita dle Rovnice 1.

$$\eta_{25\text{ }^{\circ}\text{C}} = k * p * t$$

Rovnice 1: Výpočet viskozity

$\eta_{25\text{ }^{\circ}\text{C}}$ Viskozita při 25 °C [mPas]

- k Konstanta kyvety
- p Zatížení [g]
- t Čas průchodu kuličky drahou 30 mm [s]

Stanovení epoxidového ekvivalentu dle Jaye

Při této metodě se využívá adice bromovodíku vzniklého in situ z kvartérní amoniové soli (hexydecyltrimethylamoniumbromid) a odměrného roztoku kyseliny chloristé. Titrace probíhá na indikátor krystalová violet a prvním přebytkem odměrného činidla přejde do modrozeleného zbarvení, které musí trvat alespoň 30 sekund.

Na analytických vahách bylo do titrační baňky naváženo 0,2 až 0,5 g vzorku pryskyřice. Navážka poté byla rozpuštěna ve 25 ml chloroformu a byl přidán 1 g hexydecyltrimethylamoniumbromidu v tuhém stavu. Vzorek byl titrován roztokem 0,1M kyseliny chloristé v ledové kyselině octové na indikátor krystalovou violet do modrozeleného zbarvení, stálého alespoň 30 sekund. Stejně byl proveden i slepý pokus. Výsledný epoxidový ekvivalent byl vypočten dle Rovnice 2.

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

Rovnice 2: Výpočet epoxidového ekvivalentu

EE/kg Epoxidový ekvivalent/kg

- A Spotřeba kyseliny na titraci [ml]
- B Spotřeba kyseliny na slepý pokus [ml]
- f Faktor použité kyseliny
- n Navážka vzorku [g]

Stanovení aminového čísla tvrdidla

Aminové číslo udává počet mg KOH ekvivalentního aminovým skupinám v 1 g vzorku. Je velmi důležitou charakteristikou při hodnocení látek aminové skupiny, velký význam má také pro zjištění čistoty polyaminů používaných jako tvrdidla EP.

Do 100 ml odměrné baňky bylo na analytických vahách naváženo asi 0,7 g vzorku a ta poté byla doplněna ledovou kyselinou octovou po rysku. Poté bylo odpipetováno do titrační baňky 5 ml a z odměrného válce bylo přidáno 20 ml kyseliny octové. Tento roztok byl poté titrován 0,1 M roztokem kyseliny chloristé v ledové kyselině octové. Stanovení probíhalo na indikátor krystalová violet do modrozeleného zbarvení. Stejně tak byl proveden slepý pokus. Výsledné aminové číslo bylo vypočteno dle Rovnice 3.

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

Rovnice 3: Výpočet aminového čísla tvrdidla

- č.a. Aminové číslo [mg KOH/1g vzorku]
- A Spotřeba kyseliny na titraci [ml]
- B Spotřeba kyseliny na slepý pokus [ml]
- f Faktor kyseliny
- z Zředovací faktor
- n Navážka vzorku [g]

Stanovení vytvrzovací charakteristiky

Vytvrzovací charakteristikou byla stanovena reaktivita epoxidové pryskyřice, nebo-li exotermní průběh vytvrzování. Nejdříve byla provedena kalibrace zapisovače pomocí ohřevu vody až po teplotu varu. Z této závislosti byla určena směrnice přímky. Poté byl připraven do 150 ml kádinky roztok 100 g pryskyřice a přesně vypočítaného množství tvrdidla. Byl zaznamenán nulový čas a směs se promíchala, aby byla homogenní. Kádinka byla postavena na tepelně izolující podložku a do středu byla vložena zkumavka se silikonovým olejem a termočlánkem napojeným společně s temperovaným referenčním termočlánkem na registrační voltmetr. Poté byl zapnut zapisovač a jeho rychlost byla nastavena na nejnižší rychlost (0,1mm/min). Zkouška byla ukončena po dosažení maximální teploty. Ze zkoušky byla poté

vyhodnocena T_{\max} ($^{\circ}\text{C}$) a čas potřebný k jejímu dosažení (min). Z těchto hodnot byl poté vypočítán reakční poměr – R_p dle Rovnice 4.

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

Rovnice 4: Výpočet reakčního poměru

R_p Reakční poměr

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

t Čas potřebný k dosažení maximální teploty [min]

Stanovení obsahu nespalitelných složek

Stanovení obsahu nespalitelných složek probíhalo v peci v porcelánovém kelímku. První byly kelímky vyžehány při teplotě $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu jedné hodiny. Poté byly hodinu chlazeny v exsikátoru, jakmile byly vychlazeny, tak byly zváženy a poté do nich byly přesně na analytických vahách naváženy vzorky o hmotnosti 1-2 g. Následně se vzorek spálil v peci při teplotě $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu jedné hodiny, poté byl opět vložen do exsikátoru a zchlazen. Poté se kelímek zvážil a byl vypočten obsah výztuže pro jednotlivé vzorky. Pro každý vzorek byly provedeny 2 měření a byl vyhodnocen průměr z těchto měření dle Rovnice 5.

$$w_{\%v\acute{y}ztu\acute{z}} = \frac{m_2}{m_1} * 100$$

Rovnice 5: Výpočet obsahu nespalitelných složek

m_1 Hmotnost navážky vzorku [g]

m_2 Hmotnost nespalitelného obsahu [g]

Mechanická pevnost v tahu a ohybu

Tyto zkoušky byly provedeny na stroji MTS 4/M (výrobce Sintech – MTS Systems Corporation, USA) podle ČSN EN ISO 527-4 (tah) a ČSN EN ISO 178 (ohyb). Tahové zkoušce byla podrobena zkušební tělesa s rozměry 150 na 10 mm. Upínací délka mezi čelistmi byla 100 mm a rychlost posunu čelistí $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. V deformaci se pokračuje až do porušení tělesa. Pro ohybovou zkoušku užíváme zkušební tělesa o rozměrech 60 na 10 mm. Byl proveden tříbodový ohyb. Vzdálenost podpěr byla 48 mm, rychlost posunu čelistí $1,2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Z naměřených dat se vyhodnotil modul pružnosti a mez pevnosti v tahu a ohybu. Pro tahovou zkoušku byla také vyhodnocena tažnost, pro ohybovou pak průhyb.

Trhačka MTS-4/M

MTS-4/M je jednoduchý, kompaktní a praktický přístroj pro testování všech materiálů, jejichž pevnost v tahu nepřekračuje 20kN. Vyznačuje se četnými možnostmi připojení k periferním zařízením (zapisovač, tiskárna). Ovládat přístroj je možno, jednak manuálně na digitálním displeji, tak také pomocí počítače se speciálním softwarem a s možností vytvoření různých programů pro jednotlivá měření a různé typy vzorků. Přístroj je jednofázový 220V, 50Hz, 5A. Přístroj má dva pracovní prostory o max. síle 20kN v tahu i tlaku.

Měření zátěže se provádí pomocí 5 vzájemně zaměnitelných čidel, přesnost měření zátěže je 0,5% z dané hodnoty nebo 0,1% z plné výchylky čidla. Trhačka splňuje požadavky norem NF.A. 03-501 třída O, DIN 51220 třída 0,5, BS 1610 A1 a ASTM E4. Rozsah rychlosti je 0,001 až 500 mm/min programovatelná klávesnicí v krocích 0,1 mm/min, s přesností 0,1%. Automatická rychlost zpět je 500 mm/min, s pomalým dojezdem do výchozí polohy. Čelisti jsou mechanické s namontovaným rychloupínacím trnem.

Rázová houževnatost metodou Charpy

Této metodě byla podrobena tělesa o rozměrech 50 na 6 mm a zkouška je inspirována normou ČSN EN ISO 179, ovšem tělesa byla menšího rozměru, než je stanoveno v normě z důvodu staršího typu přístroje, který neumí tyto tělesa měřit. Podstatou zkoušky je stanovení práce potřebné k porušení zkušební tělesa, na které dopadne nos rázového kladiva. Na základě rozdílu potencionálních energií kladiva (před nárazem a po nárazu) se vypočte práce potřebná k přeražení tělesa. Tuto práci lze odečíst přímo na stupnici přístroje. Rázová houževnatost je pak práce spotřebovaná k přeražení tělesa vtažená na plochu jeho průřezu. Lze ji vypočíst dle Rovnice 6.

$$a_n = \frac{A_n}{S} = \frac{A_n}{b * h} * 1000$$

Rovnice 6: Výpočet rázové houževnatosti

a_n	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
A_n	Práce potřebná k přeražení tělesa [J]
S	Plocha průřezu tělesa [mm ²]
b	Šířka zkušební tělesa [mm]

h Tloušťka zkušebního tělesa [mm]

Měření tvrdosti dle Brinella

Je měření tvrdosti materiálu, jehož způsob je detailně popsán v normě ČSN EN ISO 6506-1. Princip měření tvrdosti spočívá ve vtlačování ocelové kuličky o daném průměru do stanovovaného materiálu a následného odečtu průměru vtisku. Pro měření tvrdosti plastů se používá kalená ocelová kulička. Zde byla použita kulička o průměru 2,5mm a zatížení 153,036 N. Měření probíhalo pro všechny vzorky 30 vteřin. Výsledná tvrdost je dána vztahem mezi působící silou a průměrem vtisku. Měření tvrdosti dle Brinella proběhlo na tvrdoměru WPM LEIPZIG HPO 250 (Obrázek 49). K odečtu průměru vtisku byl použit mikroskop Olympus LEXT OLS 3000 u kterého bylo použito zvětšení 120x. Výslednou tvrdost dle Brinella lze zjistit z tabulek v normě ČSN EN ISO 6506-4. Měření proběhlo na ČVUT v Praze na fakultě strojní.



Obrázek 49: Tvrdoměr WPM LEIPZIG HPO 250

3 VÝSLEDKY A DISKUZE

3.1 Stanovení vytvrzovací charakteristiky

Byla stanovena vytvrzovací charakteristika, jejíž výsledky můžeme nalézt v Tabulce 6. Kalibrační graf lze nalézt v přílohách (Obrázek 56), dále zde lze najít vykreslené grafické závislosti při měření (Obrázek 57).

Tabulka 6: Vytvrzovací charakteristiky použitých systému

Systém	T_{max}	t	R_p
CHS EPOXY 520 + TELALIT 420	145,5 °C	170 min	0,86
CHS EPOXY 501 + TELALIT 420	63,93 °C	284 min	0,22
CHS EPOXY 520 + TELALIT 590	<25 °C	16 hod	nepatrný
CHS EPOXY 501 + TELALIT 590	<25 °C	>25 hodin	nepatrný

Z výše uvedené tabulky je zřejmé, že nejvyšší reakční poměr má systém CHS EPOXY 520 s tvrdidlem TELALIT 420, po něm následuje systém pryskyřice CHS EPOXY 501 tvrzená stejným tvrdidlem. První zmíněný systém má také nejvyšší vytvrzovací teplotu, která ovšem nedosahuje max. hodnot pro vakuovou infuzi. Ta je omezená max. teplotou pro vakuovací folii, která byla 204 °C. Obdobná max. teplota byla i pro rozvodné hadice. U systémů tvrzených pomocí TELALITu 590 byl reakční poměr nepatrný a dá se říci neměřitelný, jelikož se nedala odečíst reakční teplota, která se pravděpodobně vůbec neměnila a byla shodná s teplotou místnosti. Nepatrně rychlejší vytvrzení prokázal systém s CHS EPOXY 520, kdy k úplnému dotvrzení došlo po 16 hodinách. U systému s CHS EPOXY 501 bylo měření ukončeno po 25 hodinách. Z uvedených výsledků a z principu vakuové infuze lze říci, že se systémy tvrzené pomocí tvrdidla TELALIT 590 pro tuto metodu nehodí, pokud neprobíhá při zvýšené teplotě. Obě pryskyřice prokazovali stejný způsob dotvrzování, a to postupné zvyšování viskozity, dokud nedošlo k výslednému dotvrzení. Jejich výhodou je ovšem jejich nízká viskozita, kdy se při infuzi lépe prosycuje tkanina.

3.2 Stanovení obsahu nespalitelných složek

Byl stanoven obsah nespalitelných složek, výsledky lze nalézt v tabulkách. V tabulce 7 pro systémy se tkanou textilií a v tabulce 8 pro systémy s netkanou rohoží.

Tabulka 7: Stanovení obsahu nespalitelných složek u systému se tkanou textilií

Systém	1.vzorek	2. vzorek	Průměr
CHS EPOXY 520 + TELALIT 420	72,80 %	74,16 %	73,48 %
CHS EPOXY 520 + TELALIT 590	73,87 %	72,85 %	73,36 %
CHS EPOXY 501 + TELALIT 420	74,07 %	73,95 %	74,01 %
CHS EPOXY 501 + TELALIT 590	70,35 %	70,58 %	70,47 %

Tabulka 8: Stanovení obsahu nespalitelných složek u systému s netkanou rohoží

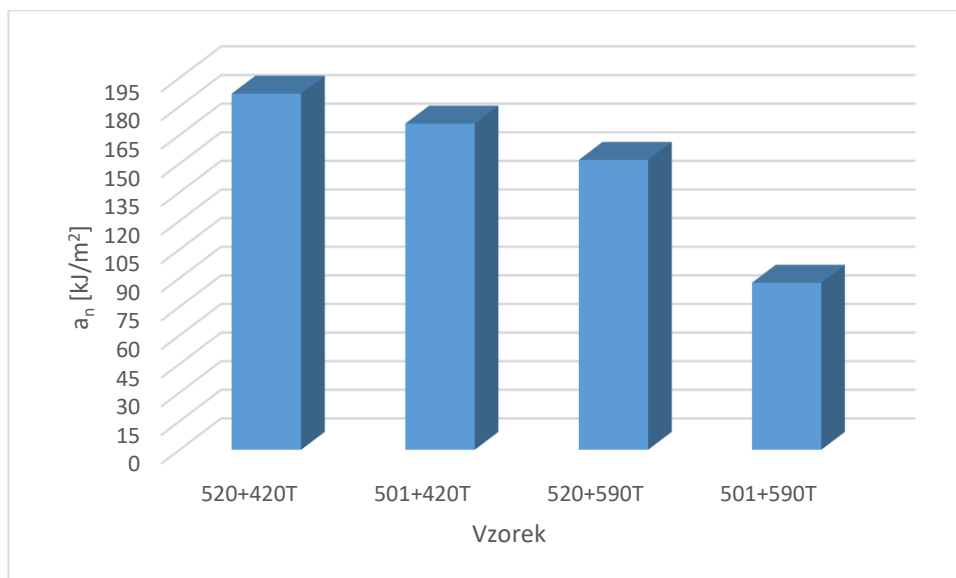
Systém	1.vzorek	2. vzorek	Průměr
CHS EPOXY 520 + TELALIT 420	47,27 %	48,63 %	47,95 %
CHS EPOXY 520 + TELALIT 590	50,04 %	50,27 %	50,16 %
CHS EPOXY 501 + TELALIT 420	51,48 %	51,47 %	51,48 %
CHS EPOXY 501 + TELALIT 590	47,23 %	48,26 %	47,75 %

Z tabulek 7 a 8 je patrné, že je poměrně velký rozsah v obsahu výztuže u systémů s tkanou textilií a netkanou rohoží. Tento rozdíl je zapříčiněn tím, že tkanina si při vakuové infuzi vezme jenom tolik pryskyřice, kolik potřebuje. Jelikož mezi jednotlivými systémy stejné výztuže není tak veliký rozsah hodnot, mohou se bez problému porovnávat mezi sebou v rámci mechanických zkoušek.

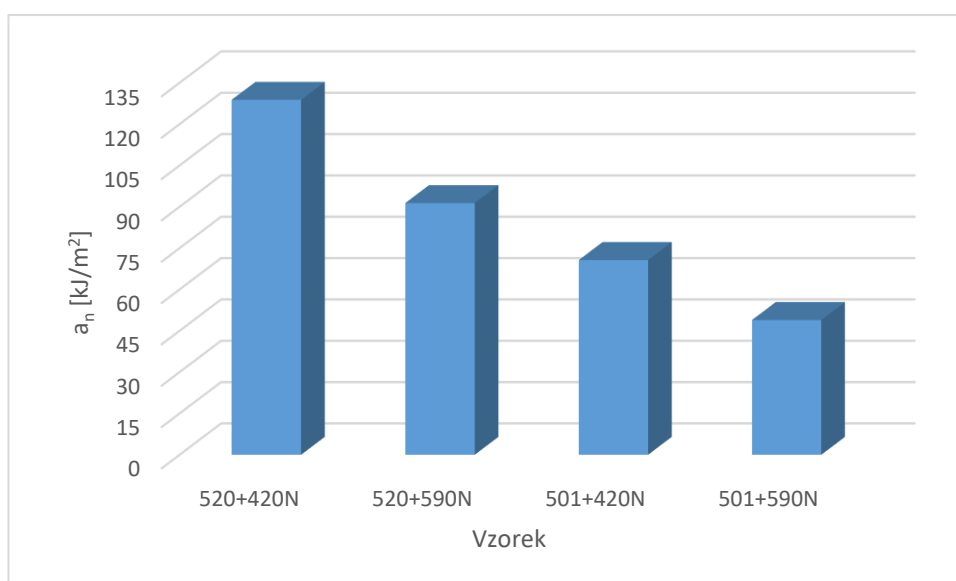
3.3 Rázová houževnatost metodou Charpy

V následujících grafech (Obrázek 50, Obrázek 51) jsou porovnány jednotlivé systémy mezi sebou. Porovnávání bylo rozděleno podle systémů s tkanou textilií a netkanou rohoží, jelikož se tyto systémy liší obsahem výztuže a nebylo by vhodné je porovnávat spolu.

V následujících grafech a tabulkách bylo použito k vyjádření systému zkratk, skládajících se z čísla pryskyřice, čísla tvrdidla a písmenka dle výztuže, kdy T je pro tkanou textilií a N pro netkanou rohož.



Obrázek 50: Graf rázové houževnatosti systémů se tkanou textilií



Obrázek 51: Graf rázové houževnatosti systémů s netkanou rohoží

Z grafů je patrné, že nejlepších hodnot rázové houževnatosti dosahuje systém CHS EPOXY 520 a TELALIT 420, ať již s tkanou textilií, nebo netkanou rohoží. Rázová houževnatost je pravděpodobně u CHS EPOXY 520 vyšší, než u CHS EPOXY 501, neboť i s tvrdidlem TELALIT 590 má vyšší rázovou houževnatost, než CHS EPOXY 501 s tvrdidlem TELALIT 420. Můžeme ovšem říci, že TELALIT 420 poskytuje s pryskyřicemi vyšší hodnoty rázové houževnatosti, než TELALIT 590. Vzorek CHS EPOXY 501 s TELALITem 590 se tkanou textilií mohl být ovlivněn uvolněním vakua při výrobě, ovšem i u systému s netkanou textilií vykazuje nejnižší hodnoty. Pokud by nám tedy šlo o systém s nejlepší rázovou

houževnatostí vyrobený vakuovou infuzí, kde je obsah výztuže dán schopností tkaniny pojmout pryskyřici, pak je výrazně výhodnější volit systémy s tkanou výztuží.

Všechny naměřené hodnoty jsou v přílohách (Tabulka 14-21). Hodnoty označené hvězdičkou byly z důvodu vysoké chyby vyloučeny z průměru.

3.4 Ohybová zkouška

Byla provedena ohybová zkouška, srovnání výsledků různých systémů nalezneme v následujících tabulkách (Tabulka 9, Tabulka 10 a) a grafech (Obrázek 52, Obrázek 53)

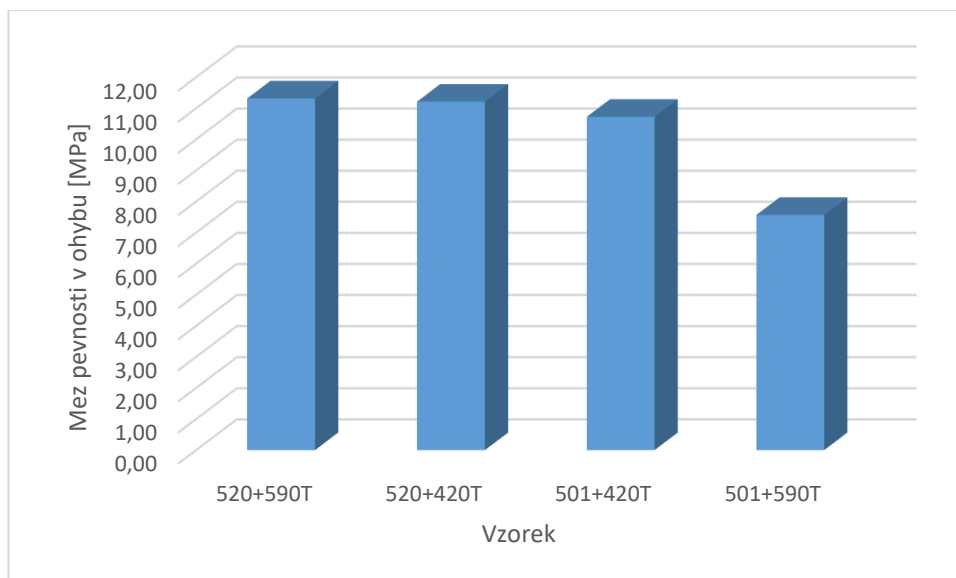
V následujících grafech a tabulkách bylo použito k vyjádření systému zkratk, skládajících se z čísla pryskyřice, čísla tvrdidla a písmenka dle výztuže, kdy T je pro tkanou textilií a N pro netkanou rohož.

Tabulka 9: Tabulka ohybových vlastností systémů se tkanou textilií

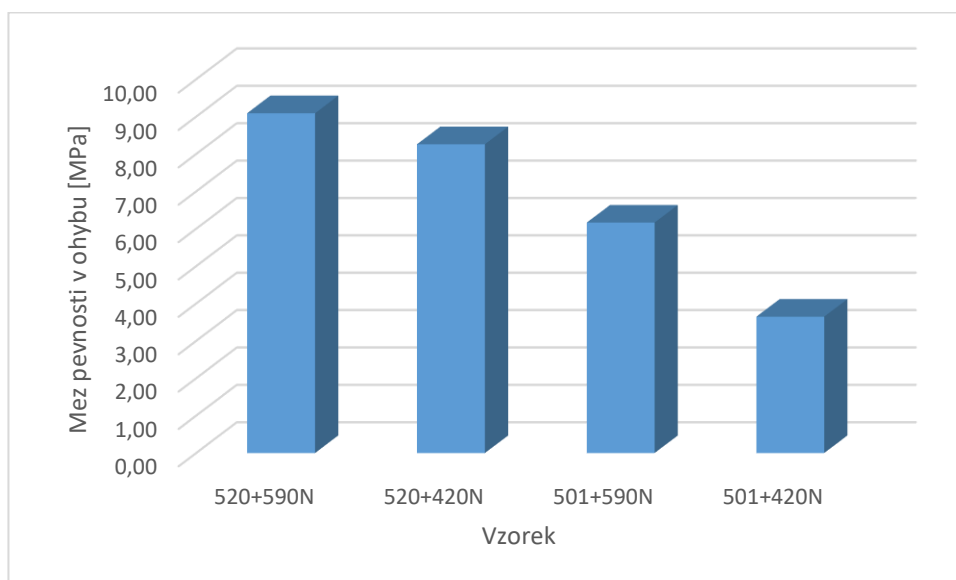
Systém	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
520+420T	264,83±14,63	10,72±0,66	2,58±0,31
520+590T	270,24±17,39	11,31±0,72	2,90±0,43
501+420T	266,08±21,99	11,21±0,76	2,08±0,16
501+590T	260,71±11,39	7,57±0,27	1,83±0,40

Tabulka 10: Tabulka ohybových vlastností systémů s netkanou rohoží

Systém	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
520+420N	217,87±14,15	8,29±0,71	3,54±0,37
520+590N	229,52±19,32	9,09±0,72	4,13±0,24
501+420N	78,90±3,20	3,65±0,15	1,79±0,28
501+590N	193,89±7,46	6,17±0,27	1,82±0,10



Obrázek 52: Graf meze pevnosti v ohybu pro systémy se tkanou textilií



Obrázek 53: Graf meze pevnosti v ohybu pro systémy s netkanou rohoží

Z grafů a tabulek je patrné, že meze pevnosti jsou u systému se tkanou výztuží velmi podobné, až na systém CHS EPOXY 501 a TELALIT 590, kde se pravděpodobně projevila chyba při výrobě, kdy se forma odvakuovala a v kompozitu vznikly prostory vzduchu, kdy tkaniny na sebe nedolehly, jak měly. Jinak by se dala předpokládat podobná mez pevnosti jako u ostatních tkanin. U systémů s netkanou rohoží se již hodnoty lišily výrazně, a to zejména u systému CHS EPOXY 501 a TELALIT 420. Po kontrole zkušebních tělísek bylo zjištěno, že obsahují poměrně velké množství vzduchových bublin v poměru se zbytkem desky. Došlo pravděpodobně k protržení formy a nasátí vzduchu v prostoru, kde se poté řezala tělíska pro

ohyb. Proto tuhle hodnotu musíme brát s rezervou. U systému CHS EPOXY 501 A TELALIT 590 takové zjištění nebylo, a proto je pravděpodobné, že systémy obsahující modifikovanou CHS EPOXY 501 mají v kombinaci s netkanou rohoží nižší meze pevnosti v ohybu, než systémy CHS EPOXY 520. Průhyby při maximu v procentech vypovídají o tom, že systémy s tvrdidlem TELALIT 590 mají lepší vlastnosti v průhybu než ty, které byly tvrzené tvrdidlem telalit 420. Jedinou výjimkou je opět systém CHS EPOXY 501 s TELALITem 590 vyztužený tkanou textilií, u kterého se projevila chyba při výrobě, stejně jako při zkoušce rázové houževnatosti a proto hodnoty ohybové zkoušky nemusí být o systému vypovídající.

Všechny naměřené hodnoty jsou v přílohách (Tabulka 22-29). Hodnoty označené hvězdičkou byly z důvodu vysoké chyby vyloučeny z průměru.

3.5 Tahová zkouška

Byla provedena tahová zkouška vyrobených vzorků a její výsledky můžeme nalézt v tabulkách (Tabulka 11, Tabulka 12) a grafech (Obrázek 54, Obrázek 55).

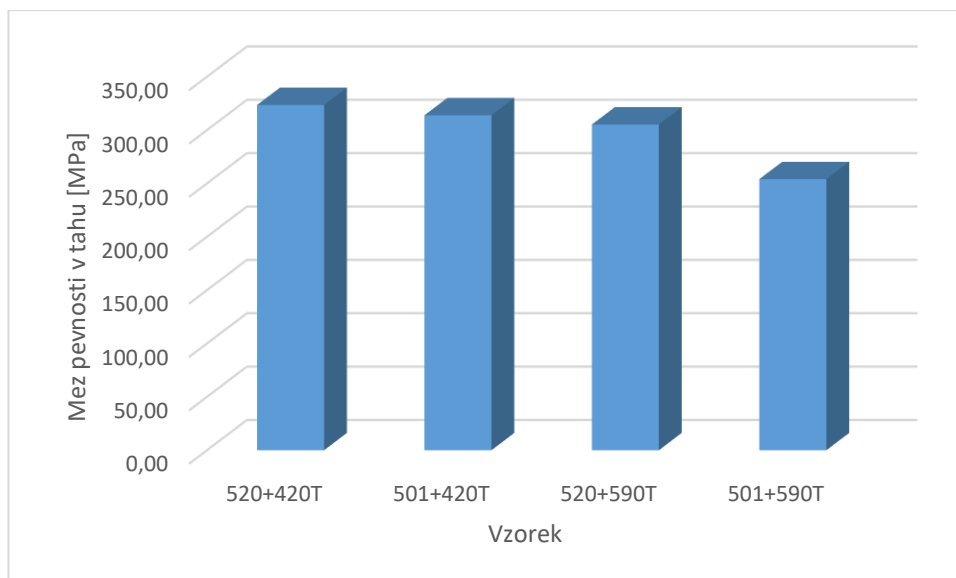
V následujících grafech a tabulkách bylo použito k vyjádření systému zkratk, skládajících se z čísla pryskyřice, čísla tvrdidla a písmenka dle výztuže, kdy T je pro tkanou textilií a N pro netkanou rohož.

Tabulka 11: Tabulka tahových vlastností systémů se tkanou textilií

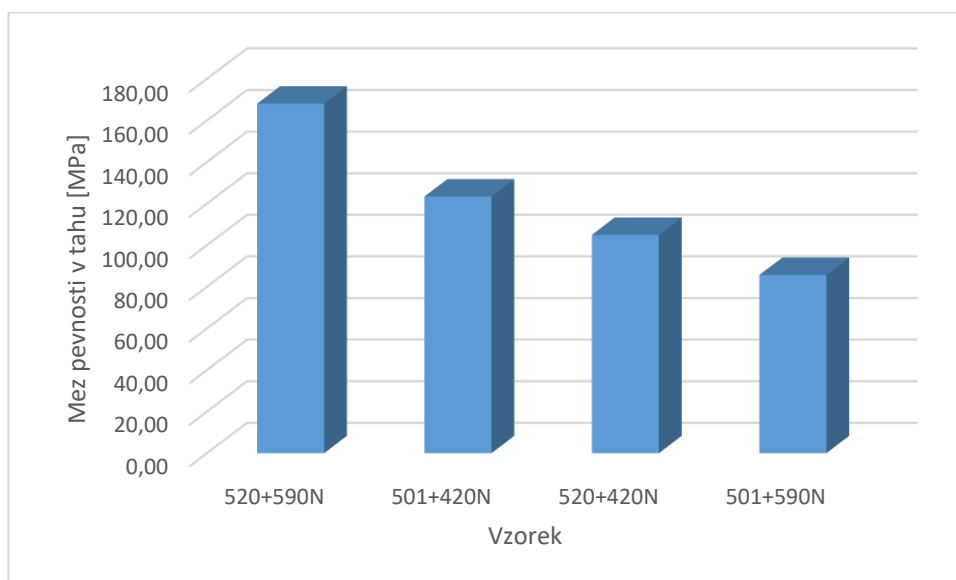
Systém	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
520+420T	7319,78±503,65	323,58±23,45	4,34±0,47
520+590T	7659,12±352,48	305,23±17,65	5,95±1,67
501+420T	7389,06±399,42	313,92±17,79	5,18±0,36
501+590T	7722,38±413,73	254,07±15,22	4,97±0,37

Tabulka 12: Tabulka tahových vlastností systémů s netkanou rohoží

Systém	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
520+420N	2927,10±212,49	104,98±10,19	2,33±0,2
520+590N	3982,40±198,80	168,10±8,17	3,22±0,26
501+420N	2571,74±119,75	123,44±5,65	2,22±0,13
501+590N	2402,8±186,42	85,69±6,65	2,77±0,25



Obrázek 54: Graf meze pevnosti v tahu systémů se tkanou výztuží



Obrázek 55: Graf meze pevnosti v tahu systémů s netkanou rohoží

Z grafů a tabulek je patrné, že stejně jako u ohybové zkoušky, prokazují systémy se tkanou textilií podobné hodnoty, což by poukazovalo na to, že nezáleží na typu matrice, ale pouze na výztuži, jedná-li se o kompozit vyztužen tkanou textilií. Je zde opět stejně patrné, že systém CHS EPOXY 501 a TELALIT 590 stejně jako u předchozích zkoušek vykazuje nižší naměřené hodnoty. U systémů s netkanou rohoží jsou rozdíly naměřených hodnot opět rozdílné, kdy naprosto nejlepší vlastnosti vykazoval systém CHS EPOXY 520 s tvrdidlem TELALIT 590. Kvalita tohoto systému se prokázala i u ohybové zkoušky. Jeho nevýhodou se ovšem zdá jeho nižší rázová houževnost. Nejhorší vlastnosti opět prokázal systém CHS EPOXY 501 s tvrdidlem TELALIT 590, ovšem systém CHS EPOXY 501 s tvrdidlem TELALIT 420 prokázal při

tahu lepší vlastnosti než systém CHS EPOXY 520 a tvrdidlo TELALIT 420, což je opačně než u zkoušky ohybové. Co se týče tažnosti, se opět systém CHS EPOXY 520 a TELALIT 590 ukázal jako nejvýhodnější stejně jako u průhybu při maximu. Opět se zdá, že systémy vytvrzené tvrdidlem TELALIT 590 vykazují vyšší prodloužení, až na výjimku u systému s CHS EPOXY 501 tvrzené tkanou textilií, kdy bychom započítali relativní chybu a problémy se vzorkem hodnota by pravděpodobně byla vyšší než pro systém CHS EPOXY 520 tvrzená TELALITem 420.

Všechny naměřené hodnoty jsou v přílohách (Tabulka 30-37). Hodnoty označené hvězdičkou byly z důvodu vysoké chyby vyloučeny z průměru.

3.6 Tvrdost dle Brinella

Tvrdost dle Brinella musela být měřena dle normy ČSN EN ISO 6506, s tím rozdílem, že k odečtu hodnot musel být použitý mikroskop z důvodu nemožného optického odečtu přímo na přístroji. Šířka vpichu kuličky byla odečtena pomocí průměru dvou na sobě kolmých přímek, které byly zhotoveny od okraje vpichu. Jelikož měření podle normy ČSN 64 0128 nebylo možné z důvodu absence kuličky o průměru 3 mm a taky z důvodu nenalezení vhodného přístroje. Jelikož jde pouze o porovnání vzorků mezi sebou a podmínky byly pro všechny stejné, pak je toto porovnání možné. Výsledky měření jsou v tabulce 13.

V následujících grafech a tabulkách bylo použito k vyjádření systému zkratk, skládajících se z čísla pryskyřice, čísla tvrdidla a písmenka dle výztuže, kdy T je pro tkanou textilií a N pro netkanou rohož.

Tabulka 13: Tabulka tvrdosti dle Brinella měřených systémů

systém	Tvrdost dle Brinella [MPa]
501+590T	HK/2,5/153,036=21,65
501+590N	Tvrdost neměřitelná
501+420T	HK/2,5/153,036=18,5
501+420N	HK/2,5/153,036=17,5
520+420T	HK/2,5/153,036=22,5
520+420N	HK/2,5/153,036=22,7
520+590T	HK/2,5/153,036=23,7
520+590N	HK/2,5/153,036=23,7

U vzorku CHS EPOXY 501 s tvrdidlem TELALIT 590 vyztuženého netkanou rohoží nebyla tvrdost změřena z důvodu velmi malé tvrdosti, která byla mimo možnost stanovení dle normy. Rozměr vpichu byl větší než 1,5 mm, což je maximální mez, pro kterou je tato norma

vytvořena pro kuličku 2,5 mm. Po prozkoumání vzorku nebylo zjištěno, čím by to mohlo být způsobeno, jelikož u vzorku se tkanou textilií byla tvrdost dle Brinella za těchto podmínek stanovena na 21,65, lze předpokládat, že by tvrdost měla být obdobná jako tomu je u ostatních systémů. Nejvyšších hodnot tvrdosti dosáhl systém CHS EPOXY 520 a TELALIT 590 přičemž s oběma výztužemi měl tento systém tvrdost 23,7. I vzorek CHS EPOXY 520 a TELALIT 420 dosáhli velmi podobných hodnot tvrdosti pro obě výztuže. Což je dáno pravděpodobně tím, že na povrchu kompozitu je vrstva pryskyřice bez vláken. Systém CHS EPOXY 501 a TELALIT 420 již měl mezi tvrdostmi větší rozdíl. Systém CHS EPOXY 501 a TELALIT 590 nelze srovnat v rámci výztuže, jelikož u vzorku s netkanou rohoží nebyla získána hodnota tvrdosti. Nejmenších hodnot dosáhl systém CHS EPOXY 501 a TELALIT 420, které byly v rámci měřených systémů nižší.

4 ZÁVĚR

Cílem bylo vyrobít pomocí vakuové infuze vzorky použitelné pro porovnání různých druhů matic a výztuže. Jedinou výjimkou byl vzorek CHS EPOXY 501 tvrzený pomocí tvrdidla TELALIT 590, vyztužen tkanou textilií. Při jeho výrobě došlo k porušení formy a uvolnění napětí, a tudíž musíme výsledky tohoto systému brát s rezervou a nelze říct, jak by se choval v ideálním stavu. Jeho chování lze pouze předpokládat podle některých znalostí o chování kompozitů.

Jelikož u vakuové infuze probíhá prosycení dle schopnosti tkaniny pojmout pryskyřici, bylo provedeno stanovení obsahu nespalitelných složek, aby bylo možno určit jaký obsah výztuže je ve výsledném vzorku. Bylo potvrzeno, že netkaná rohož má schopnost pojmout více pryskyřice než tkaná textilie. Proto byly systémy s netkanou rohoží hodnoceny separátně od systému se tkanou textilií. Ovšem v rámci hodnocení vzorků vyrobených vakuovou infuzí, je možné i porovnání v rámci těchto systémů a zvolit optimální možnost pro potřebné mechanické vlastnosti.

Celkově ze zkoušek mechanických pevností vyšla nejlépe pryskyřice CHS EPOXY 520, ať již tvrzená TELALITem 590, či TELALITem 420. Kdy v rámci všech hodnocených systémů, jak se tkanou textilií, tak i s netkanou rohoží obsadila první místo, i když u některých zkoušek vykazovali všechny systémy velmi podobné vlastnosti. Ovšem výsledky CHS EPOXY 501 s tvrdidlem TELALIT 590 se tkanou textilií byly ovlivněny problémem u přípravy vzorku, a tak nelze tvrdit, že CHS EPOXY 520 je lepší, i když se zdá být univerzálnější. U tahových zkoušek bylo nejvíce patrné, že kompozit se stejným směrem vláken má pevnost ovlivněnou zejména touto výztuží a matrice složí pouze k přenosu napětí, tudíž všechny systémy se tkanou textilií dopadli velmi podobně, vyjma systému CHS EPOXY 501 s TELALITem 590, který byl ovlivněn již zmíněnou chybou. U systému, které byly vyztuženy netkanou rohoží byly větší rozdíly v naměřených hodnotách, které by mohly odpovídat tomu, že výztuž není ve všech vzorcích uspořádána stejně, jako tomu je u kompozitů vyztužených tkanou textilií.

V rámci celkové práce mohu říci, že i když by měla být pryskyřice CHS EPOXY 501 vhodnější pro svou nízkou viskozitu pro vakuovou infuzi, tak se o mnoho lépe pracovalo s pryskyřicí CHS EPOXY 520, jejíž reologické vlastnosti mi přišli výhodnější. Dále pak tvrdidlo TELALIT 590 nelze vůbec doporučit pro vakuovou infuzi za normální teploty z důvodu velmi dlouhého vytvrzování.

5 CITOVANÁ LITERATURA

- [1] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [2] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] MALLICK, P. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed., [expanded and rev. ed.]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. ISBN 978-0-8493-4205-9.
- [5] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. 1. vydání. Brno: Technický dozorčí spolek Brno - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.
- [6] *Polymerní kompozity*. 1. Praha: Úst. makromolekulární chemie ČSAV, 1990. ISBN 80-850-0905-6.
- [7] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.
- [8] Poly(propene) (Polypropylene). *The Essential Chemical Industry* [online]. York, UK: University of York Centre for Industry Education Collaboration, 2016 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polypropene.html>
- [9] Poly(ethene) (Polyethylene). *The Essential Chemical Industry* [online]. York, UK: University of York Centre for Industry Education Collaboration, 2016 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyethene.html>
- [10] KUTZ, Myer. *Applied plastics engineering handbook: processing, materials, and applications* [online]. 2nd Edition. Boston, MA: Elsevier, 2016 [cit. 2018-03-28]. ISBN 978-0-323-39040-8. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAPEHPMA5/applied-plastics-engineering/applied-plastics-engineering>

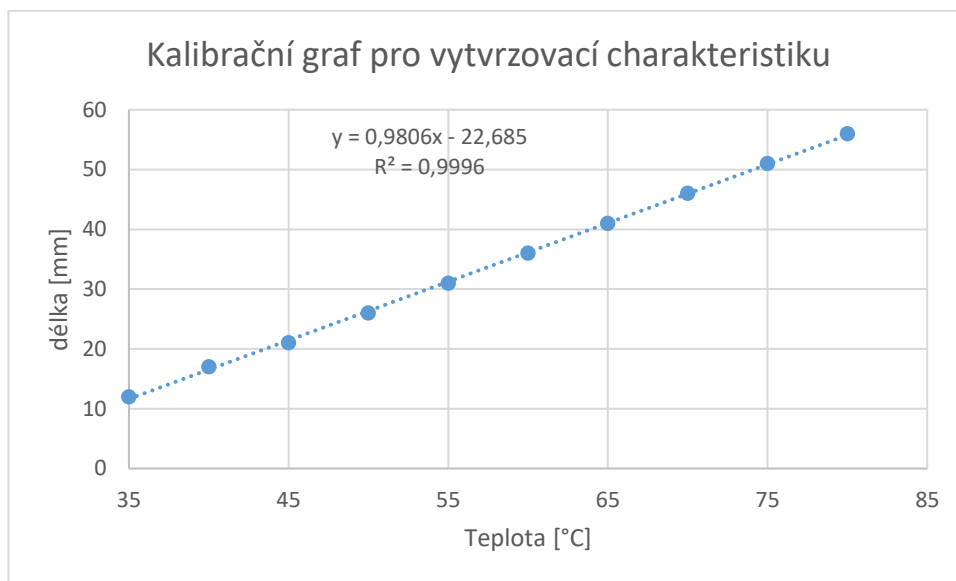
- [11] ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Makromolekulární chemie: úvod do chemie a technologie polymerů*. Vyd. 3., dopl. a upr. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-761-2.
- [12] KIPP, Dale, ed. *Plastic material data sheets*. Blacksburg, Va.: MatWeb, Division of Automation Creation, Inc, 2004. ISBN 9781591247203.
- [13] HOA, Suong. *Principles of the Manufacturing of Composite Materials*. Department of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering, Concordia University, Montreal, Canada: DEStech Publications, 2009. ISBN 978-1-932078-26-8.
- [14] *Ullmann's Polymers and Plastics: Products and Processes*. 4. vydání. Wiley-VCH, 2016. ISBN 978-3-527-33823-8.
- [15] MIRACLE, Daniel a Steven DONALDSON. *ASM handbook: Composites*. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2001. ISBN 978-0-87170-703-1.
- [16] ASH, Michael a Irene ASH. *Handbook of plastic and rubber additives*. Second edition. Synapse Information Resources, Inc., 2013. ISBN 978-162-8700-169.
- [17] GILBERT, Marianne. *Brydson's plastics materials*. 8. vydání. Boston, MA: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-323-35824-8.
- [18] WEIL, Edward a Sergei LEVCHIK. *Flame retardants for plastics and textiles: practical applications*. 2nd edition. Cincinnati: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-578-4.
- [19] BENVENUTO, Mark. *Industrial chemistry: for advanced students*. Boston: De Gruyter, 2015. ISBN 978-3-11-035169-9.
- [20] *Material Selection for Thermoplastic Parts: Practical and Advanced Information for Plastics Engineers*. Amsterdam: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-7020-6284-1.

- [21] SELKE, Susan a John CULTER. *Plastics packaging: properties, processing, applications, and regulations*. 3rd edition. Cincinnati: Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-443-5.
- [22] EHRENSTEIN, Gottfried, Gabriela. RIEDEL a Pia. TRAWIEL. *Thermal analysis of plastics: theory and practice*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications [distributor], 2004. ISBN 978-1-56990-362-9.
- [23] BABOIAN, Robert. *NACE Corrosion Engineer's Reference Book*. 4th Edition. NACE International, 2016. ISBN 978-1-57590-321-7.
- [24] ANTEC 2010 *Plastics: Annual Technical Conference Proceedings*. Society of Plastics Engineers, 2010. ISBN 978-0-9753707-8-0.
- [25] 235431 ALDRICH Methyl-5-norbornene-2,3-dicarboxylic anhydride. *Sigma-Aldrich* [online]. b.r. [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/235431?lang=en®ion=CZ>
- [26] KAR, Kamal. *Composite materials: processing, applications, characterizations*. 1st edition. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-49512-4.
- [27] GOODMAN, Sidney H. *Handbook of thermoset plastics*. 2nd ed. Westwood, N.J.: Noyes Publications, 1998. ISBN 978-0-8155-1421-3.
- [28] AGARWAL, Bhagwan a Lawrence BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN 04-217-87.
- [29] RUDD, C.D. *Liquid moulding technologies: resin transfer moulding, structural reaction injection moulding, and related processing techniques*. 1. vydání. Warrendale, PA: SAE International, 1997. ISBN 978-185-5732-421.
- [30] THORNBURROW, P. *Recent advances in glassfibre preforming: Proc. 3rd Conference on Hands Off GRP*. Coventry, 1989, p. 12.

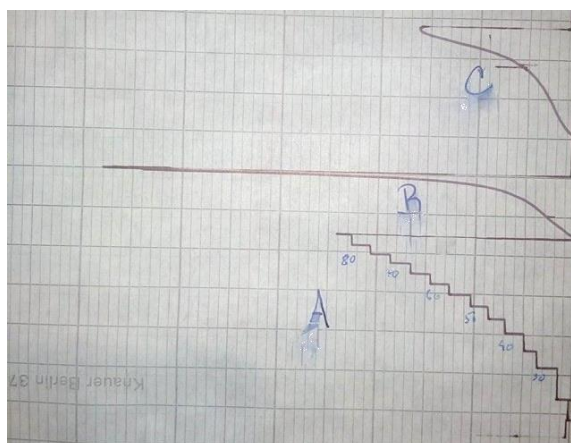
- [31] MIAO, Menghe a John XIN. *Engineering of high-performance textiles*. Cambridge, MA, United States,: Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2018. ISBN 978-0-08-101273-4.
- [32] *The science of armour materials*. 1st edition. Waltham, MA: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-08-101002-0.
- [33] *DuPont; Kevlar: Technical Guide*. Richmond, b.r. Dostupné také z: http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics-fibers-and-nonwovens/fibers/documents/DPT_Kevlar_Technical_Guide_Revised.pdf
- [34] KOLAŘÍK, Jan. *Vysokomodulová polymerní vlákna a vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha: Academia, 1984. Pokroky chemie. ISBN 21-013-84.
- [35] GOODSHIP, Vanessa, Bethany MIDDLETON a Ruth CHERRINGTON. *Design and manufacture of plastic components for multifunctionality: structural composites, injection molding, and 3d printing*. Boston, MA: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-323-34061-8.
- [36] *Technologie výroby kompozitů: vakuové prosyčování* [online]. Havel composites, b.r. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [37] STRONG, A. Brent. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. 2nd ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 2008. ISBN 978-0-87263-854-9.
- [38] *Havel composites: Technický list k separátoru Oskar's M 700/C Wax* [online]. b.r. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/proddocs/Oskar%20M%20700.pdf>
- [39] *Havel Composites: katalog* [online]. b.r. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: http://www.havel-composites.com/ktlgfiles/cz_katalog.pdf
- [40] *Airtech: online catalog* [online]. b.r. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://www.airtechintl.com/en/products>

[41] *Teddington: Dual stage Vacuum Pump (Valve)* [online]. France, b.r. [cit. 2018-06-07].
Dostupné z: <http://www.teddington.com/en/dual-stage-vacuum-pump-value-tf-ve225n-sv-2248.html>

6 PŘÍLOHY



Obrázek 56: Kalibrační graf pro stanovení teploty při vytvrzovací charakteristice.



Obrázek 57: Závislosti vykreslené při vytvrzovací charakteristice A- kalibrace, B- 520+420, C-501+420

Tabulka 14: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 520 a telalit 590 s netkanou rohoží

šířka [mm]	výška [mm]	An [J]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
5,78	2,22	1,25	87,28
5,7	2,27	1,3	90,42
5,55	2,4	1,4	95,35
5,73	2,31	1,2	80,84
5,78	2,36	1,35	89,44
5,85	2,3	1,35	90,67
5,77	2,36	1,3	85,929
5,72	2,32	1,46	100,22
5,71	2,3	1,47	102,03

Tabulka 15: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 501 a telalit 590 s netkanou rohoží

šířka [mm]	výška [mm]	An [J]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
5,73	3,01	1,1	56,24
5,39	2,93	0,91	49,39
5,71	2,88	0,89	46,21
5,68	2,9	0,91	47,35
5,99	3,15	1,24	58,83
5,81	2,77	0,74	37,90*
5,77	2,93	0,85	42,59
5,77	2,98	0,9	44,78
5,71	2,88	0,9	46,82
5,58	3,06	0,95	48,02

Tabulka 16: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 520 a telalit 420 s netkanou rohoží

šířka [mm]	výška [mm]	An [J]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
5,9	2,5	1,11	114,29
6	2,5	1,13	115,29
5,87	3	1,36	136,41
5,85	2,5	1,24	130,54
5,92	2,5	1,25	130,64
5,94	2,51	1,21	125,44
5,86	2,58	1,19	123,22
5,98	2,65	1,05	104,28*
6,01	2,93	1,4	139,82
5,88	2,4	1,34	143,72

Tabulka 17: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 501 a telalit 420 s netkanou rohoží

šířka [mm]	výška [mm]	An [J]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
5,69	2,26	0,65	62,89
5,69	2,2	0,69	68,44
5,57	2,26	0,65	63,86
5,57	2,26	0,7	70,24
5,61	2,25	0,74	75,06
5,82	2,38	0,84	84,14
5,52	2,26	0,65	64,27
5,61	2,28	0,7	69,71
5,54	2,2	0,65	64,60
5,79	2,35	0,83	83,54

Tabulka 18: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 520 a telalit 590 se tkanou textilií

šířka [mm]	výška [mm]	An [J]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
5,91	2,5	1,95	123,18
5,92	2,52	2,45	155,51
5,83	2,52	2,11	134,77
5,82	2,5	2,24	145,02
5,84	2,5	2,5	162,33
5,86	2,5	2,55	165,19
5,83	2,45	2,14	140,72
5,83	2,51	2,35	151,71
5,76	2,49	2,33	153,39
5,76	2,54	2,46	159,26

Tabulka 19: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 501 a telalit 590 se tkanou textilií

šířka [mm]	výška [mm]	An [J]	Rázová houževnatost [kJ/m]
5,83	3	1,6	84,05
5,76	2,96	1,61	86,81
5,76	2,83	1,56	87,73
5,88	3,04	1,7	87,83
5,77	2,98	1,64	87,82
5,81	2,93	1,55	83,42
5,76	2,89	1,7	94,31
5,86	3,08	1,7	86,99
5,93	2,87	1,65	89,31
5,79	2,98	1,64	87,51

Tabulka 20: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 520 a telalit 420 se tkanou textilií

šířka [mm]	výška [mm]	An [J]	Rázová houževnatost [kJ/m]
5,65	2,13	1,4	160,67
5,84	2,23	1,62	182,16
5,64	2,21	1,7	197,45
5,77	2,27	1,59	179,10
5,66	2,16	1,45	166,24
5,71	2,23	1,8	207,81
5,73	2,19	1,49	169,19
5,81	2,34	1,8	202,45
5,79	2,24	1,74	198,00
5,82	2,18	1,78	203,75

Tabulka 21: Rázová houževnatost systému CHS epoxy 501 a telalit 420 se tkanou textilií

šířka [mm]	výška [mm]	An [J]	Rázová houževnatost [kJ/m]
5,72	2,16	1,39	157,36
5,72	2,24	1,5	169,59
5,8	2,3	1,64	183,95
5,67	2,32	1,42	158,94
5,82	2,33	1,65	184,05
5,82	2,27	1,58	176,76
5,84	2,28	1,4	153,94
5,82	2,28	1,55	172,83
5,8	2,31	1,6	178,79
5,79	2,28	1,55	173,48

Tabulka 22: Tabulka ohybových vlastností systému 501+590T

vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
1.	9,98	3,51	242	6,91	1,5
2.	9,79	3,44	255,6	7,59	1,28
3.	9,82	3,51	269,2	7,81	2,67
4.	9,84	3,44	252	7,44	2,26
5.*	9,8	3,44	338	10,03	2,51
6.*	9,89	3,5	253,2	7,31	1,01
7.	9,91	3,49	285,6	8,26	1,97
8.*	9,89	3,42	327,6	9,69	2,42
9.	9,84	3,46	253,4	7,44	1,47
10.	9,91	3,59	267,2	7,51	1,68

Tabulka 23: Tabulka ohybových vlastností systému 501+590N

vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
1.	9,93	3,21	201,2	6,31	1,77
2.	9,81	3,3	193,2	5,97	1,56
3.*	9,62	3,15	176,2	5,815	4,29
4.	9,75	3,17	198	6,41	1,83
5.	9,72	3,22	181	5,78	1,8
6.	9,76	3,12	190	6,24	1,81
7.	9,7	3,29	214,6	6,72	2,17
8.	9,78	3,16	195,2	6,32	1,84
9.	9,77	3,21	194	6,19	1,88
10.	9,65	3,32	177,8	5,55	1,72

Tabulka 24: Tabulka ohybových vlastností systému 520+590T

vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
1.	9,33	2,52	283,8	12,07	2,73
2.	9,3	2,51	271,2	11,62	2,46
3.	9,4	2,6	272,8	11,16	2,45
4.	9,28	2,55	287,2	12,14	2,81
5.	9,27	2,58	242,6	10,14	2,84
6.	9,26	2,64	311,6	12,75	3,76
7.	9,29	2,65	281,8	11,45	2,17
8.	9,22	2,55	227,8	9,69	3,94
9.	9,26	2,6	256,8	10,67	3,16
10.	9,2	2,53	266,8	11,46	2,7

Tabulka 25: Tabulka ohybových vlastností systému 520+590N

vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
1.	9,89	2,62	211,6	8,17	3,93
2.	9,9	2,7	261,8	9,79	3,99
3.	9,76	2,63	244,2	9,51	4,43
4.	9,82	2,59	212,4	8,35	4,44
5.	9,77	2,57	244	9,72	4,24
6.	9,76	2,51	208,2	8,50	4,21
7.	9,83	2,44	244	10,17	3,8
8.	9,78	2,51	210	8,55	3,59
9.	9,79	2,57	208,8	8,30	4,25
10.	9,82	2,59	250,2	9,84	4,39

Tabulka 26: Tabulka ohybových vlastností systému 520+420N

vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
1.	9,77	2,47	189,8	7,87	3,98
2.*	9,74	2,48	178,4	7,39	4,19
3.	9,84	2,55	221,8	8,84	3,48
4.	9,85	2,97	231,4	7,91	3,01
5.	9,74	2,29	212	9,50	3,9
6.	9,83	2,53	196,2	7,89	3,76
7.	9,86	2,67	231,6	8,80	4,17
8.	9,84	2,79	249,2	9,08	3,34
9.	9,95	2,97	219	7,41	3,03
10.	9,88	3,01	209,8	7,05	3,17

Tabulka 27: Tabulka ohybových vlastností systému 520+420T

vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
1.	9,65	2,37	284,6	12,44	2,44
2.*	9,61	2,59	161,8	6,50	2,51
3.*	9,75	2,44	178,2	7,49	1,81
4.	9,61	2,43	242	10,36	3
5.*	9,65	2,61	169,8	6,74	2,29
6.	9,59	2,65	248,8	9,79	2,48
7.	9,62	2,61	259,8	10,35	2,09
8.*	9,73	2,57	188,2	7,53	3,39
9.	9,74	2,66	284,6	10,98	3,11
10.	9,64	2,68	269,2	10,42	2,38

Tabulka 28: Tabulka ohybových vlastností systému 501+420N

vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
1.	9,51	2,33	77,6	3,50	1,92
2.	9,35	2,34	83,8	3,83	2,16
3.	9,41	2,25	75,6	3,57	2,03
4.	9,34	2,31	72	3,34	1,6
5.	9,34	2,3	80,2	3,73	1,56
6.	9,44	2,24	81,8	3,87	1,45
7.	9,48	2,28	76,6	3,54	1,7
8.	9,43	2,34	85,8	3,89	2,47
9.	9,42	2,25	77,8	3,67	1,57
10.	9,34	2,36	77,8	3,53	1,45

Tabulka 29: Tabulka ohybových vlastností systému 501+420T

vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [Mpa]	Průhyb při max [%]
1.	9,82	2,37	263,4	11,32	1,87
2.*	9,78	2,35	198,8	8,65	1,83
3.	9,81	2,45	273,6	11,38	2,3
4.	9,74	2,4	223	9,54	2,25
5.*	9,77	2,36	198,2	8,60	1,79
6.	9,85	2,48	335	13,71	2,33
7.	9,74	2,4	260,4	11,14	1,99
8.	9,84	2,46	277,6	11,47	1,88
9.	9,83	2,36	242,6	10,46	2,03
10.	9,83	2,41	253	10,68	1,98

Tabulka 30: Tabulka tahových vlastností systému 501+420T

Vzorek	šířka [mm]	tloušťka [mm]	délka [mm]	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
1.	9,54	2,67	100	8272,80	324,78	5,81
2.	9,52	2,44	100	7119,20	306,48	5,51
3.	9,55	2,34	100	7341,40	328,52	5,02
4.	9,48	2,53	100	7427,00	309,66	5,30
5.	9,37	2,31	100	7523,20	347,58	5,24
6.	9,50	2,39	100	7440,80	327,72	5,54
7.	9,60	2,61	100	7674,00	306,27	4,81
8.	9,60	2,59	100	7180,60	288,80	4,91
9.	9,52	2,35	100	6786,20	303,33	4,71
10.	9,40	2,56	100	7125,40	296,10	4,91

Tabulka 31: Tabulka tahových vlastností systému 501+590T

Vzorek	šířka [mm]	tloušťka [mm]	délka [mm]	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
1.	9,65	3,18	100	8208,2	267,48	5,38
2.	9,60	3,15	100	7967,2	263,47	4,95
3.	9,59	3,14	100	8318,4	276,24	5,14
4.	9,61	3,14	100	7537,4	249,79	5,42
5.	9,59	3,10	100	7769,4	261,34	4,48
6.	9,79	3,19	100	7483,6	239,63	4,47
7.*	9,54	3,12	100	6372,8	214,11	4,53
8.	9,63	3,20	100	7213,2	234,07	5,16
9.	9,67	3,13	100	7281,6	240,58	4,76
10.*	9,53	3,20	100	6413,4	210,30	3,96

Tabulka 32: Tabulka tahových vlastností systému 520+590T

Vzorek	šířka [mm]	tloušťka [mm]	délka [mm]	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
1.	9,76	2,58	100	7543,00	299,55	4,50
2.	9,70	2,61	100	7412,00	292,77	4,10
3.	9,65	2,45	100	7629,00	322,68	4,81
4.	9,74	2,50	100	7972,40	327,41	7,63
5.	9,69	2,54	100	7708,20	313,18	7,33
6.	9,77	2,62	100	8126,60	317,48	7,66
7.	9,74	2,62	100	8260,80	323,71	7,65
8.	9,70	2,60	100	7297,60	289,36	7,31
9.	9,71	2,69	100	7289,40	279,07	4,12
10.	9,70	2,64	100	7352,20	287,11	4,38

Tabulka 33: Tabulka tahových vlastností systému 520+420T

Vzorek	šířka [mm]	tloušťka [mm]	délka [mm]	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
1.	9,41	2,31	100	6814,60	313,50	4,18
2.	9,42	2,36	100	7968,20	358,42	5,02
3.	9,45	2,38	100	8128,60	361,42	5,01
4.	10,01	2,34	100	7044,20	300,73	4,06
5.	9,68	2,40	100	7470,00	321,54	4,52
6.*	9,52	2,30	100	6462,80	295,16	3,60
7.*	9,52	2,41	100	8896,00	387,74	5,18
8.	9,45	2,43	100	7252,20	315,81	3,84
9.	9,60	2,33	100	6775,00	302,89	4,27
10.	9,62	2,35	100	7105,40	314,30	3,84

Tabulka 34: Tabulka tahových vlastností systému 501+590N

Vzorek	šířka [mm]	tloušťka [mm]	délka [mm]	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
1.*	9,23	2,95	100	1939,20	71,22	1,84
2.	9,26	3,00	100	2323,40	83,64	2,56
3.	9,34	3,05	100	2452,40	86,09	3,00
4.*	9,36	2,94	100	2992,60	108,75	3,89
5.	9,34	3,05	100	2512,00	88,18	2,76
6.	9,25	2,95	100	2045,20	74,95	2,38
7.	9,37	3,08	100	2359,80	81,77	2,69
8.	9,23	3,03	100	2389,60	85,44	2,70
9.	9,24	3,02	100	2434,40	87,24	2,86
10.	9,21	2,99	100	2705,60	98,25	3,17

Tabulka 35: Tabulka tahových vlastností systému 520+590N

Vzorek	šířka [mm]	tloušťka [mm]	délka [mm]	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
1.	9,86	2,40	100	4038,40	170,66	3,36
2.	9,74	2,47	100	4125,00	171,46	3,33
3.	9,89	2,39	100	4235,00	179,17	3,62
4.	9,77	2,36	100	3803,00	164,94	2,90
5.	9,77	2,44	100	3820,80	160,28	3,08
6.	9,78	2,38	100	4212,40	180,97	3,50
7.	9,79	2,42	100	3716,40	156,86	2,86
8.	9,66	2,40	100	3796,60	163,76	3,12
9.	9,63	2,58	100	4093,80	164,77	3,23
10.*	9,44	2,49	100	3584,80	152,51	2,86

Tabulka 36: Tabulka tahových vlastností systému 520+420N

Vzorek	šířka [mm]	tloušťka [mm]	délka [mm]	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
1.	9,55	2,92	100	2716,80	97,43	2,09
2.	9,60	3,00	100	3135,00	108,85	2,44
3.	9,67	2,93	100	3138,80	110,78	2,38
4.*	6,68	2,90	100	2362,60	84,16	1,95
5.	9,69	2,87	100	2775,00	99,78	2,35
6.	9,68	2,87	100	3110,40	111,96	2,66
7.	9,71	2,99	100	2594,20	89,35	2,12
8.	9,78	3,02	100	2760,20	93,45	2,14
9.	9,59	2,74	100	3057,80	116,37	2,55
10.	9,61	2,72	100	3055,40	116,89	2,27

Tabulka 37: Tabulka tahových vlastností systému 501+420N

Vzorek	šířka [mm]	tloušťka [mm]	délka [mm]	mez pevnosti [N]	mez pevnosti [MPa]	tažnost [%]
1.	9,12	2,31	100	2528,60	120,03	2,10
2.	9,41	2,24	100	2771,00	131,46	2,30
3.	9,20	2,26	100	2603,60	125,22	2,21
4.	9,16	2,21	100	2572,40	127,07	2,14
5.	9,24	2,22	100	2492,60	121,51	2,24
6.	9,29	2,28	100	2450,20	115,68	2,09
7.	9,33	2,28	100	2772,80	130,35	2,53
8.	9,30	2,27	100	2512,40	119,01	2,20
9.	9,33	2,23	100	2426,00	116,60	2,14
10.	9,31	2,18	100	2587,80	127,50	2,25