

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Polymerní kompozity ve stavebnictví

Viktor Peprník

Bakalářská práce

2021

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Viktor Peprník**
Osobní číslo: **C18013**
Studijní program: **B2829 Anorganické a polymerní materiály**
Studijní obor: **Polymerní materiály a kompozity**
Téma práce: **Polymerní kompozity ve stavebnictví**
Zadávající katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte dostupnou literaturu o polymerních matricích, výztužích a vlastnostech kompozitních materiálů používaných ve stavebním průmyslu.
2. Rozdělte kompozitní materiály na částicové a ty, jež používají kontinuální výztuže.
3. Rozdělte používané kompozity podle stavebních oborů (náterové hmoty, izolační hmoty, vyztužující prvky, podlahoviny, atd.).
4. Uvedte výhody a eventuální nevýhody vybraných kompozitů ve Vámi vybraných stavebních oborech.
5. Celou bakalářskou práci vytvořte jako teoretický přehled.
6. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 9/2012 „Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu“.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Večeřa, CSc.**
Ústav chemie a technologie makromolekulárních
látek

Datum zadání bakalářské práce: **18. prosince 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. července 2021**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

doc. Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Párdubicích dne 28. února 2020

Prohlašuji:

Tuto práci jsem 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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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 nákladu, 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 Pravidla pro odevzdání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Viktor Peprník

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou využití polymerních kompozitních materiálů v různých odvětvích stavebního průmyslu. Pojednává o rozdělení kompozitů do jednotlivých skupin, o technologiích výroby polymerních kompozitních materiálů, a také nastiňuje problematiku adheze. Podrobněji jsou popsány především vláknové polymerní kompozity a asfalty modifikované polymery.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polymery, stavebnictví, vlákna, kompozity, adheze, asfalt, matrice

TITLE

Polymer composites in construction

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with the use of polymer composite materials in various sectors of the construction industry. It deals with the division of composites into individual groups, the technologies of production of polymeric composite materials, and also outlines the issue of adhesion. In particular, fibrous polymer composites and polymer-modified asphalts are described in more detail.

KEYWORDS

Polymers, construction, fibers, composites, adhesion, asphalt, matrix

Obsah

Úvod.....	9
1 Definice základních pojmů.....	10
2 Rozdělení kompozitních materiálů.....	14
2.1 Podle disperzní fáze	14
2.2 Podle tvaru disperze	14
2.2.1 Vláknové kompozity.....	15
2.2.2 Částicové kompozity.....	18
2.3 Podle typu matrice.....	19
2.3.1 Kompozity s plastovou matricí	19
2.3.2 Kompozity s kovovou matricí.....	21
2.3.3 Kompozity s keramickou matricí.....	21
3 Adheze v kompozitech	22
3.1 Mechanické zaklínění.....	23
3.2 Fyzikální adheze.....	24
3.3 Chemická adheze	25
4 Polymerní kompozitní materiály ve stavebnictví	26
4.1 Nátěrové hmoty	26
4.2 Podlahové krytiny	26
4.3 Izolační hmoty.....	27
4.4 Vyztužující prvky.....	28
4.5 Modifikované asfalty	28
4.6 Lepidla a tmely.....	28
5 Vláknové polymerní kompozity	30
5.1 Matrice	30
5.1.1 Nenasycené polyestery	31
5.1.2 Epoxidové pryskyřice	33
5.1.3 Vinylesterové pryskyřice	35
5.2 Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)	36
5.2.1 Výroba kontinuálních skleněných vláken.....	36
5.2.2 Vlastnosti	37
5.3 Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP).....	39
5.3.1 Výroba uhlíkových vláken.....	39
5.3.2 Vlastnosti	40

5.4	Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP)	40
5.4.1	Výroba aramidových vláken	40
5.4.2	Vlastnosti	41
5.5	Technologie výroby polymerních kompozitních materiálů	42
5.5.1	Pultruze (tažení)	42
5.5.2	Stříkání	43
5.5.3	Ruční kladení	44
5.5.4	SMC (Sheet Moulding Compound)	44
5.5.5	Injektážní technologie – vysokotlaké RTM vstřikování	45
5.5.6	Navíjení	45
5.5.7	Odstředivé lití	46
5.6	Přehled studií provádějících zkoušky na kompozitech FRP	47
5.6.1	Ohybové aplikace	47
5.6.2	Smykové aplikace	47
5.6.3	Axiální uplatnění	48
5.7	Společnosti vyrábějící kompozitní materiály	49
5.7.1	Theodor Vanck GmbH	49
5.7.2	Ameron International	49
5.7.3	Future Pipe Industries	49
5.7.4	HOBAS CZ	50
6	Asfalty modifikované polymery	51
6.1	Princip míšení polymeru a asfaltu – kompatibilita směsi	52
6.2	Polymery používané jako modifikátory v asfaltových pojivech	53
6.2.1	Termoplastické elastomery	54
6.2.2	Plastomery	56
7	Závěr	58
8	Seznam použité literatury	59

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Pracovní diagram ocelové tyče	12
Obrázek 2 - Struktura vlákna Zylon (PBO)	16
Obrázek 3 - Struktura vlákna M5 (PPID)	17
Obrázek 4 - Příklad špatného smáčení povrchu částice polymerní taveninou	23
Obrázek 5 - Příklad dobrého smáčení povrchu částice polymerní taveninou.....	23
Obrázek 6 - Základní schéma smáčivosti pevného povrchu kapalinou.....	24
Obrázek 7 - Výroba nenasyčeného polyesteru	31
Obrázek 8 - Schéma vytvrzování nenasyčeného polyesteru.....	32
Obrázek 9 - Kondenzace bisfenolu A s epichlorhydrinem	33
Obrázek 10 - Reakce přípravy vysokomolekulární epoxidové pryskyřice reakcí nízkomolekulární EP s dianem	34
Obrázek 11 - Výroba vinylesterové pryskyřice esterifikací	35
Obrázek 12 - Schéma výroby kontinuálních skleněných vláken	37
Obrázek 13 - Polykondenzační reakce výroby poly(p-fenylen-tereftalamidu)	41
Obrázek 14 - Schéma technologie výroby kompozitů pultruzí	43
Obrázek 15 - Schéma technologie stříkání	43
Obrázek 16 - Schéma technologie ručního kladení	44
Obrázek 17 - Schéma výroby kompozitů metodou SMC	45
Obrázek 18 - Schéma technologie navíjení	46
Obrázek 19 - Schéma odstředivého lití.....	46
Obrázek 20 - Schéma použití FRP kompozitu v axiálním směru.....	48
Obrázek 21 - Grafické znázornění mechanických vlastností AMP v závislosti na stupni zbotnění makromolekul	53
Obrázek 22 - Strukturní vzorec SBS kaučuku	55
Obrázek 23 - Strukturní vzorec polymeru SEBS	55
Obrázek 24 - Strukturní vzorec SBR kaučuku.....	56
Obrázek 25 - Strukturní vzorec PEVA	57

Úvod

První kompozity byly lidmi používány už ve starověkém Egyptě, kdy hlinu vyztužovali slámou a získali tak vhodný stavební materiál. [2] V současné době jsou kompozity široce využívanými materiály nejen ve stavebnictví, ale i v automobilovém průmyslu, letectví, elektrotechnické praxi a jiných odvětvích. Kompozity, ve kterých funkci matrice zastupuje polymer, se začaly ve větší míře používat až v 2. polovině 20. století, kdy došlo k největšímu rozmachu na poli výroby a zpracování polymerních látek.

Stavebnictví je v současné době oborem, jenž se velmi rychle rozvíjí a ve kterém je kladen stále větší důraz na rychlost provedení dané operace, kvalitu stavebního materiálu a jeho šetrnost k životnímu prostředí, a v neposlední řadě taky na cenu materiálu. Právě tady vstupují na scénu kompozity, které se skládají vždy alespoň z dvou různých materiálů, a výsledné vlastnosti kompozitu proto převyšují vlastnosti původních materiálů a přinášejí tak nové možnosti do různých průmyslových odvětví. Určité typy kompozitů se v "moderním" stavebnictví používají už po delší dobu, např. železobeton nebo asfaltové směsi pro stavbu silnic. Jiné typy kompozitů, jako např. sklolamináty nacházejí uplatnění až v posledních desetiletích. Záměrem práce je seznámení s rozdělením a využitím jednotlivých kompozitních materiálů ve stavebnictví.

1 Definice základních pojmů

Pro lepší pochopení problematiky polymerních kompozitů a porovnání vlastností jednotlivých materiálů je vhodné na začátek uvést několik důležitých pojmů, které budou v práci dále využity.

Polymerní materiál

Polymerní materiál neboli polymer, je látka, která se skládá z velkého počtu stavebních jednotek, tzv. merů, vzájemně spojených kovalentními vazbami. Polymery vykazují na rozdíl od nízkomolekulárních látek odlišné vlastnosti, které vyplývají z mimořádné velikosti jejich molekul. Jejich snadná zpracovatelnost a dobré mechanické vlastnosti je řadí v současnosti mezi široce používané materiály.

Kompozitní materiál

Neexistuje všeobecně uznávaná definice kompozitního materiálu neboli zkráceně kompozitu. Lze uvést, že kompozit je materiál, který se skládá alespoň ze dvou složek (matrice a disperze), které se od sebe liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi, ale spolu tvoří jeden homogenní celek.

Matrice

Hlavním úkolem matrice je spojovat disperzní fázi a chránit ji před okolními vlivy. [1] Matrice určuje rozměry a tvar kompozitu, drží ho pohromadě a je v celém rozsahu spojitá. [2] Umožňuje také přenášet zatížení mezi jednotlivými komponenty disperzní fáze. [5]

Disperzní fáze

Jedná se nejčastěji o všechny ostatní složky, které jsou v matrici rozptýleny, typicky vlákna nebo částice. Hlavním úkolem disperzní fáze je přenášet zatížení působící na matrici a zlepšovat vlastnosti výsledného kompozitu. [5] Obecně lze říci, že vlákna a částice ovlivňují především pevnost, houževnatost, tepelnou stabilitu a další vlastnosti kompozitního materiálu.

Youngův modul pružnosti

Lze definovat pomocí Hookova zákona, podle kterého se jedná o poměr napětí k relativní deformaci. Relativní deformace je charakterizována jako podíl délky tělesa po deformaci a původní délky tělesa. V rozsahu elastické deformace (materiál se vrací do původní polohy po skončení působení deformační síly) se jedná o materiálovou konstantu charakteristickou pro jednotlivé látky. [4]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Kde σ je napětí [Pa], E je Youngův modul pružnosti [Pa] a ε je relativní prodloužení.

Pevnost

Pevností se rozumí vlastnost materiálu, která vyjadřuje jeho odolnost vůči působení vnějších sil. [3] Obecně lze říci, že pevnost vypovídá o maximální hodnotě napětí σ , nejčastěji v megapascalích, po jehož překročení dojde k poškození materiálu, vzniku trhlinek. Napětí lze definovat jako sílu, která působí kolmo na jednotkovou plochu.

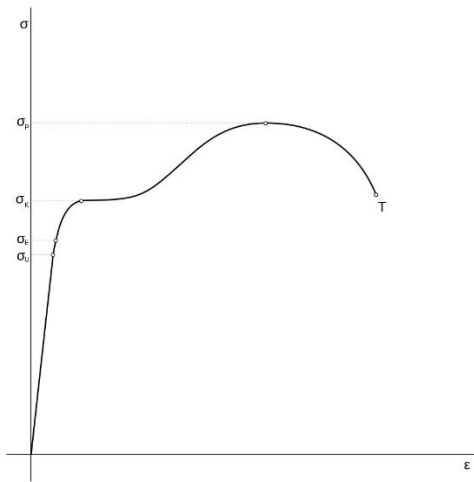
Stanovuje se různými zkouškami a pro účely této bakalářské práce je vhodné definovat pevnost v:

- tahu
- tlaku
- ohybu

Všechny zkoušky se provádějí podle určitých norem. Zatěžovaný materiál musí mít přesně stanovené parametry, které závisí na typu zkoušky, jež je prováděná na daném přístroji. Výsledkem zkoušky je pak diagram závislosti napětí na relativním prodloužení materiálu.

Zkouška tahem spočívá v namáhání tělesa tahem při stanovené rychlosti deformace. Zkušební vzorek je uchycen do kleští ze dvou stran, přičemž působící napětí způsobuje prodloužení vzorku. Do meze úměrnosti, kdy je deformace ještě pružná, lze závislost napětí na relativním prodloužení charakterizovat pomocí Hookova zákona.

Po překročení meze úměrnosti dochází k plastické deformaci materiálu, který se už nedokáže vrátit do svého původního tvaru, a pro výpočet napětí je nutné použít složitější vztahy. [4]



Obrázek 1 - Závislost mezi napětím a prodloužením pro ocelovou tyč [36]

Kde σ_U [Pa] značí napětí při dosažení meze úměrnosti, σ_K [Pa] napětí při mezi kluzu a σ_P [Pa] napětí při dosažení meze pevnosti.

Při měření pevnosti v tlaku je těleso umístěno mezi dvě závaží, která jsou stlačována k sobě. Při stlačování dochází ke zkracování tělesa a opět platí přímá úměra mezi napětím a deformací materiálu do meze úměrnosti, podobně jako u zkoušky tahem.

Při zkoušce v ohybu, kterou lze provádět například na trhacím stroji MTS-4/M, je těleso volně položeno na dvou podpěrách a zatěžováno uprostřed mezi podpěrami. Kromě meze pevnosti v ohybu je často žádanou hodnotou pro konstrukční praxi i průhyb při maximu.

Houževnatost

Houževnatost se dá charakterizovat, jako míru odporu proti vzniku trhlinek v materiálu. Malou houževnatost mají zejména křehké a tvrdé materiály, které jsou schopny absorbovat jen malé množství energie, než dojde k jejich poškození. To způsobuje především absence elastické a plastické deformace, které se v největší míře podílejí na absorpci energie. [6]

Povrchové napětí

Je zapříčiněno přitažlivými silami, kterými na sebe působí částice v kapalině. Po nalití kapaliny do nádoby se přitažlivé síly částic ve většině objemu nádoby vyrovnají, pouze výslednice přitažlivých sil molekul na povrchu nabývá nenulových hodnot a zdánlivě směřuje dovnitř

kapaliny (po započítání odpuzivých sil je výsledný systém v rovnováze). To způsobuje, že po nalití kapaliny až po okraje nádoby vznikne malý kopeček. Kapalina se vždy snaží dosáhnout co nejmenší plochy za daného objemu, aby systém měl co nejmenší energii, a proto za ideálních podmínek, kdy na kapalinu nebudou působit vnější síly, zaujme kulovitý tvar. Povrchové napětí lze tedy chápat jako poměr práce nebo energie, kterou je třeba vynaložit na zvětšení plochy, a plochy, která vznikla jejím působením. [16][17]

$$\sigma = \frac{E}{S}$$

E je povrchová energie [J], σ je povrchové napětí [J/m²] a S je plocha [m²].

2 Rozdělení kompozitních materiálů

Výsadou kompozitů, kterou lze považovat zároveň za jejich slabinu, je skutečnost, že výsledné vlastnosti materiálu nejsou v celém jeho rozsahu stejné a odvíjí se od jeho složení a rozložení disperzní fáze. Kompozity jsou proto anizotropními látkami, jelikož jejich vlastnosti silně závisí na směru. Jako příklad lze uvést kompozit s kontinuální vláknennou výztuží, který bude vykazovat značně větší odolnost vůči síle, jež bude působit ve směru vláken než kolmo na ně. Důležitým pojmem je také synergický efekt, kdy spojením dvou nebo více látek o odlišných vlastnostech získá výsledný kompozit lepší vlastnosti, nedosažitelné u jednotlivých složek samostatně. Výše zmíněné poznatky umožňují v dnešní době připravit kompozity téměř na míru pro jednotlivá odvětví průmyslu. Pro podrobnější popis kompozitních materiálů je vhodné uvést tři nejběžnější způsoby jejich dělení: podle disperzní fáze, typu matrice a podle tvaru disperze.

2.1 Podle disperzní fáze

- **Kompozity prvního typu** – obsahují disperze v pevném skupenství. Pro technickou praxi jsou dnes nejdůležitější a je na ně kladen největší důraz. [2]
- **Kompozity druhého typu** – mají disperze v kapalně fázi. Jedná se o pórovité struktury, kde póry mohou být vyplněny například mazacím olejem, přičemž kapalina se nachází buď v uzavřených, nebo otevřených pórech. Z přírodních kompozitů lze do této skupiny započítat dřevo. [2]
- **Kompozity třetího druhu** – obsahují disperze v plynné fázi. Do této skupiny patří zejména pěnové materiály, které reprezentují především různé kovové pěny. [2]

2.2 Podle tvaru disperze

Zásadní vliv na anizotropii vlastností a způsob interakce mezi matricí a disperzí má tvar jednotlivých složek disperzní fáze. Kompozitní materiály lze podle tvaru disperze rozdělit na vláknové a částicové. Důležitou roli hraje také orientace disperzní fáze, protože materiál bude mít jiné vlastnosti při náhodné orientaci vláken v prostoru a odlišné při jejich pravidelném uspořádání. Významným faktorem ovlivňujícím výsledné vlastnosti kompozitu je také to, zda jsou vlákna rozložena v jedné, nebo více vrstvách kompozitu. Vlákna lze dále ještě rozdělit na krátká, dlouhá nebo spojitá, která „nejsou uvnitř kompozitu přerušena“. [2]

2.2.1 Vláknové kompozity

Přírodní vlákna z rostlin – vlákna rostlinného původu, která se používají jako výztuže v kompozitních materiálech, se získávají z rostlin, mezi které lze zařadit např. jutu, konopí, len, sisal, kenaf, bavlnu, kapok, ramii nebo kokosové ořechy, u kterých se vlákna vyrábějí z plodů. [13] Základní složkou všech těchto vláken je celulóza, která je nejdůležitější stavební látkou v buněčných stěnách rostlin a ve formě dlouhých polymerních řetězců vytváří někdy velmi složité fibrilární struktury. [2] Přírodní vlákna používaná jako výztuže kompozitů, ze kterých se vyrábějí například díly osobních automobilů, se označují pod názvem NFRP, neboli „Natural Fiber Reinforced Plastics“. Použití rostlinných vláken v termoplastech s sebou nese určité výhody: mají nižší hmotnost v porovnání se synteticky připravovanými vlákny, jsou biodegradabilní, cena výsledného výrobku je nižší v porovnání s jinými typy vyztuží, dochází k úspoře polymeru a odpad lze recyklovat. [13]

Tabulka 1 – Mechanické vlastnosti vybraných typů vláken [2]

Vlákno	Hustota [g/cm ³]	Mez pevnosti [MPa]	Youngův modul [GPa]	Tažnost [%]
Konopí	1,5	460	70	1,7
Juta	1,3	440	60	2,0
Len	1,5	340	100	1,8
Bavlna	1,5	300	27	10

Skleněná vlákna – jedná se o anorganická vlákna, která se jako vyztužující prvky používají nejčastěji v kompozitech s polymerní matricí ve formě kontinuálních vláken nebo stříže. [9] Hlavními přednostmi jsou nízká tepelná vodivost a tepelná roztažnost, vysoká hodnota Youngova modulu pružnosti, která nabývá hodnot 80 až 100 GPa, vysoká pevnost, nehořlavost a dobrá chemická odolnost. Mezi nevýhody lze zařadit vyšší hustotu, přibližně kolem 2,5 g/cm³, malou odolnost vůči únavě a nižší smáčivost, kterou lze ale zvětšit lubrikací povrchu. [2] V současné době jsou skleněné výztuže nedílnou součástí kompozitních konstrukčních materiálů. V roce 2001 činila celosvětová produkce skelných vláken 2,5 milionu tun. [9]

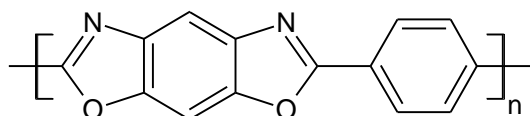
Uhlíková a grafitová vlákna – uhlíková vlákna se skládají z velkého počtu atomů uhlíku, vzájemně spojených kovalentními vazbami. Spojením atomů uhlíku dochází ke vzniku krystalické struktury, která odpovídá za vysokou pevnost vlákna. Grafitová vlákna se liší pouze vyšším obsahem uhlíku ve své struktuře, ve které převažuje krystalický grafit. [10] Vlastnosti vláken: hustota přibližně 1,8 až 2 g/cm³, menší tažnost než u skleněných vláken, ale výrazně

větší tuhost, jsou elektricky vodivá, mají výborné tepelné vlastnosti, jsou stabilní do 1000 °C a při vhodné ochraně před oxidací odolávají teplotám do 2000 °C. Grafitová vlákna vykazují značně odlišné chování při působení síly ve směru vláken, nebo kolmo na ně. Vlastnosti se mohou lišit až v jednotkách řádů. Uhlíková vlákna se nejčastěji vyrábějí z polyakrylonitrilových vláken. Samotný proces výroby se skládá z několika kroků. Na závěr je vhodné vždy vlákna povrchově upravit, aby se dosáhlo lepší adheze k matrici. [2]

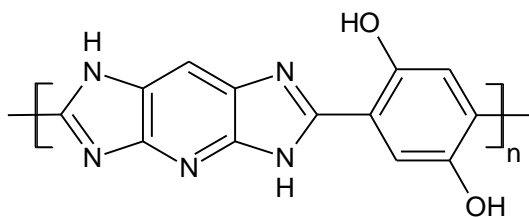
Plastová vlákna – vyrábějí se z polymerních látek. Běžná vlákna na bázi polyethyltereftalátu, polyamidu nebo polyakrylonitrilu dosahují nízkých hodnot pevností a Youngova modulu v porovnání se skleněnými vlákny. Zvlákněním z taveniny lze dosáhnout maximálních hodnot pevností okolo 1000 MPa, ale Youngův modul pružnosti se bude zvyšovat jen nepatrně. Polymerní vlákna s vysokým modulem pružnosti (např. Kevlar, HMPP, PBO, PPID) se proto vyrábějí z jiných polymerů odlišnými způsoby. Jedny z nejdůležitějších vlastností, příslušející všem plastovým vláknům, bez ohledu na způsob jejich přípravy, je nízká hustota, jen okolo 1,4 g/cm³. Ostatní vlastnosti, mezi které lze započítat např. pevnost a Youngův modul budou záviset na chemické struktuře a způsobu výroby polymeru. Mechanické vlastnosti různých typů vláken jsou přehledně uvedeny v tabulce 2. [11]

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti plastových vláken [11] (informace v grafu pocházejí z různých zdrojů)

Vlákno	Pevnost v tahu [MPa]	Youngův modul [GPa]	Hustota [g/cm ³]	Tažnost [%]
PA66	900	5	1,14	13,5
Kevlar 49 - aramidové	3600	130	1,44	2,5
Zylon® HM - PBO	5800	280	1,56	2,5
M5® - PPID	5300	350	1,7	1,4
Spectra®900 - UHMW PE	2570	73	0,97	3,9



Obrázek 2 - Struktura vlákna Zylon (PBO), nazývaného také poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazol) [13]



Obrázek 3 - Struktura vlákna M5 (PPID) [13]

Keramická vlákna – je pro ně charakteristická vysoká tepelná odolnost a stabilita při zvýšených teplotách, vysoká tuhost a malá tepelná roztažnost. Jsou poměrně křehká, proto se v praxi používají spíše krátká vlákna, která mohou mít formu např. tyčinek. Přidávají se zejména do kompozitů s keramickou a kovovou maticí pro vysoké teploty. [2]

Kovová vlákna – jejich výroba je poměrně levná, ale velkou nevýhodou je vysoká hodnota hustoty kovových materiálů, z kterých se zhotovují. Používají se pro různé aplikace, např. pro zvýšení pevnosti hliníkových slitin se využívá ocelových vláken, naopak wolframová vlákna je vhodné použít pro zpevnění žárovzdorných materiálů. „Velmi zajímavá jsou vlákna borová. Jsou velmi lehká, přitom tuhá a pevná. Jejich výroba je poměrně obtížná, zpravidla se vyrábí jako tzv. Borsic vlákna: na tenký wolframový drát se nanáší chemickou depozicí z par BCl_3 borová vrstva a její povrch se chrání proti oxidaci (nebo případné difuzi boru do matrice) tenkou vrstvou karborunda.“ [2]

Tabulka 3 - Základní vlastnosti kovových vláken [2]

Vlákno	Bor	Wolfram	Beryllium	Ocel
Pevnost [GPa]	2,8	4,2	1,4	1,5
Youngův modul [GPa]	385	414	240	210
Hustota [g/cm ³]	2,63	19,3	1,83	7,8

Whiskery – jedná se o typ monokrystalů s průměrem menším než 1 mikrometr, které mají obvykle tvar krátkých vláken. V jejich krystalové struktuře se nevyskytují téměř žádné poruchy, což má za následek vysokou hodnotu pevnosti těchto vláken. Používají se kupříkladu pro zvýšení pevnosti polymerních matic již vyztužených jiným typem disperze. Whiskery lze rozdělit na:

- Kovové – čisté kovy nebo jejich slitiny
- Keramické – korund, SiC,...

- Uhlíkové

„Výroba whiskerů spočívá v katalyticky podporované kondenzaci přesycených par na podložce (metoda VLS, „Vapor-Liquid-Solid“), výsledkem jsou velmi čisté monokrystaly.“ [11] Některé typy whiskerů, konkrétně například na bázi azbestu s sebou nesou určitá zdravotní rizika. Po vdechnutí těchto drobných vláken, které se ukládají v plicích, může dojít v případě azbestu až ke vzniku karcinomu. [2]

Tabulka 4 - Mechanické vlastnosti whiskerů [2]

Látka	Korund	SiC	Si ₃ N ₄	C
Hustota [g/cm ³]	3,96	3,17	3,18	2,26
Pevnost [GPa]	15	21	14	19
Youngův modul [GPa]	470	270	380	7

2.2.2 Částicové kompozity

Důležitou roli splňují částicové disperze především v kompozitních materiálech s polymerní matricí, která se sama o sobě vyznačuje nízkými hodnotami tuhosti a Youngova modulu. Zvýšení tuhosti výsledného kompozitu lze dosáhnout přidáním částic s větší hodnotou modulu pružnosti než má samá matrice, ale zároveň může dojít ke snížení houževnatosti polymeru. Je proto nutné odstranit tzv. koncentrátoři napětí, kterými mohou být velké primární částice plniva nebo agregáty malých částic. K rychlému růstu velikostí agregátů dochází po překročení kritické objemové koncentrace, která je pro každý polymer jiná. Při vhodné úpravě povrchu částic a jejich správně zvoleném objemovém zlomku lze dosáhnout lepších interakcí mezi jednotlivými složkami kompozitu. Může se to projevit dalším zvýšením pevnosti nebo houževnatosti kompozitu. [12][15] Částicové disperze se nevyžívají pouze ke zlepšení pevnosti, Youngova modulu a dalších mechanických vlastností, ale žádoucí je i úprava elektrické vodivosti, tepelné odolnosti, útlumu vibrací a dalších. Mezi typické materiály používané jako částicové disperze lze zařadit sklo, ve formě plných, nebo dutých kuliček, a keramické disperze. [2]

Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti některých částicových disperzí [2]

Částice	Pevnost v tlaku [MPa]	Youngův modul [GPa]	Hustota [g/cm ³]
Al ₂ O ₃	2500	390	3,9
SiO ₂	1100	70	2,5
SiC	500	240	3,0
Sklo	50	90	2,5

2.3 Podle typu matrice

Nejběžněji se kompozitní materiály rozdělují podle typu matrice do tří skupin: s plastovou, kovovou nebo keramickou maticí. Dá se ještě rozlišit kompozity se skleněnou maticí, které se také používají, ale nelze je jednoznačně přiřadit do jedné ze tří hlavních skupin. Vzhledem k podobným vlastnostem se nejčastěji přiřazují ke keramickým maticím. [2]

2.3.1 Kompozity s plastovou maticí

V anglické literatuře se často označují pod zkratkou PMC – „Plastic Matrix Composites“. Matrice je tvořena polymerním materiálem, ve kterém je rozptýlená disperzní fáze. Kompozity s polymerní maticí lze rozčlenit na matrice, jejichž základem je reaktoplast, termoplast nebo elastomer. [12]

Matrice na bázi elastomerů – jako konstrukční nebo stavební materiály se používají spíše sporadicky. Vyznačují se vysokou homogenitou, která umožňuje použití malých částic pro zvýšení pevnosti. [2] Polydienové nebo silikonové kaučuky se mohou používat jako výchozí látky pro výrobu matrice.

Termoplastické matrice – matrice na bázi termoplastů jsou lacinější, mají vyšší houževnatost a lze je opětovně tepelně zpracovávat. Je vhodné je používat při teplotách nižších, než je teplota skelného přechodu. Nevýhodou je přítomnost plastické deformace, při dlouhodobém zatěžování materiálu. [12] Termoplastické polymery mají amorfni nebo semikrystalickou strukturu a v závislosti na stupni krystalinity, který je určen rychlostí chlazení polymeru, se budou měnit i mechanické vlastnosti materiálu. Mezi běžně používané polymery pro výrobu termoplastických matic lze započítat polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyethylterftalát (PET), polyakrylonitrilbutadienstyrenový kaučuk (ABS), polyamid (PA), polykarbonát (PC) a další. Vyrábí se z nich například sportovní obuv nebo lékařské protézy,

kde se využívá jejich odolnosti vůči vzdušné vlhkosti a značné houževnatosti. S výjimkou obvykle užívaných termoplastů se pro vysokoteplotní aplikace uplatňují tzv. High-Performance termoplastické pryskyřice – polyetherketon (PEK), polyarylsulfon (PAS), polyetherimid (PEI), polyethersulfon (PES) a další, které po vytvrzení neabsorbují vodu a odolávají působení vlhkosti. Tyto pryskyřice vyztužené pevnými vlákny vykazují znamenité vlastnosti v oblasti tlumení vibrací a odolností vůči nárazu. [14]

V termoplastech se používají disperze ve formě částic o průměru minimálně deseti mikrometrů. Hlavním úkolem částic je zvýšit tuhost matrice, potlačit vibrace, snížit smrštění plastů a zmenšit účinek viskoelastického chování. Typickým příkladem může být polystyrenová matrice s celulózovými částicemi, ze které se vyrábí antivibrační hmota nebo kompozit složený z polyethylenu s příměsí 70 – 80 % olověného prášku, který poskytuje ochranu proti rentgenovému a gama záření. [2]

Vlákna v termoplastických maticích většinou značně ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitu. Pro běžnou matici s 40% obsahem skleněných vláken je charakteristické trojnásobné zvýšení pevnosti v tahu a osmkrát větší tuhost ve srovnání s nevyztuženou maticí. Optimální množství vláken v termoplastické matici se pohybuje mezi 40 a 50 %. [2]

Matrice na bázi reaktoplastů – termosety jsou nejčastěji používanými polymery v kompozitních materiálech. Tepelně je lze zpracovávat pouze jednou, jelikož působením zvýšené teploty dochází v jejich struktuře k nevratným změnám a vzniku polymerní sítě. [14] Rozsah intramolekulárních reakcí při vzniku sítě bude záviset na mechanismu síťovací reakce a funkčnosti výchozích složek. Nutnou podmínkou pro vznik sítě, ale ne vždy dostačující, je přítomnost monomeru s třemi nebo více funkčními skupinami, které budou v průběhu síťovací reakce působit jako tzv. body větvení. Dá se předpokládat, že přítomnost většího počtu více funkčních monomerů bude mít za následek vznik sítě s vyšší hustotou zesítění. Vytvrzování je spojeno se vzájemnými reakcemi reaktivních skupin monomerů a předpolymerů v reakční směsi. Molekulová hmotnost vzrůstá až do dosažení bodu gelace, kdy současně s viskozitou zdánlivě nabývá nekonečných hodnot, přičemž dochází k propojení rozvětvených molekul v jedinou trojrozměrnou síť. Vytvrzené reaktoplasty charakterizuje zvýšená mechanická, tepelná a chemická odolnost a vyšší elasticita. [12][15] Nejčastěji používanými reaktoplasty, sloužícími jako polymerní matrice, jsou: nenasycené polyestery, epoxidové pryskyřice, fenoplasty, aminoplasty a polyuretany.

2.3.2 Kompozity s kovovou maticí

Označují se také MMC – „Metal Matrix Composites“. Na rozdíl od polymerních kompozitů nacházejí kompozitní materiály s kovovou maticí uplatnění v průmyslu až v posledních desetiletích. Kovové matrice zpravidla není potřeba zpevňovat nebo zvyšovat jejich tuhost. Hlavním záměrem výroby MMC je rozšířit teplotní rozsah použitelnosti kovu, zmenšit vliv vysokých nebo nízkých teplot na mechanické vlastnosti, snížit hustotu v porovnání s čistým kovem, zvýšit rozměrovou stabilitu a ořezuvzdornost. Typickými materiály používanými pro výrobu MMC jsou různé slitiny hliníku, které nejčastěji v kombinaci s částicovou disperzí SiC, Al₂O₃ nebo vláknennou výztuží vynikají dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí a mají vynikající poměr pevnosti k hustotě. Mezi často využívané kovové matrice lze započítat také slitiny na bázi titanu, které jsou těžší než hliníkové slitiny, ale poměr pevnosti k hustotě mají vyšší. [2]

Výhodami MMC v porovnání s kompozity s polymerní maticí jsou větší pevnost a tuhost, nehořlavost, jsou dobrými vodiči tepla a elektrického proudu, je možné je používat při vyšších pracovních teplotách. Nevýhodami jsou vyšší hustota, komplikovanější výroba, která je zároveň i nákladnější. [2]

2.3.3 Kompozity s keramickou maticí

Značí se také CMC – „Ceramic Matrix Composites“. Pro keramické materiály je charakteristická obzvláště vysoká teplotní stabilita, vysoká tvrdost, odolnost vůči korozi a náhlým teplotním změnám. Jako matrice se používají hlavně z důvodu nízké hustoty a možnosti uplatnění při teplotách vyšších než 2000 °C. Naopak značná křehkost a malá odolnost proti vzniku trhlinek patří mezi zásadní nevýhody keramických materiálů. Hlavním důvodem produkce CMC je proto dosažení vyšší lomové houževnatosti, lepší obrobiteľnosti matrice a zvýšení pevnosti v tahu. Lze toho docílit přidávkou částic nebo vláken s vyšší pevností, než má matrice. Obvykle pro výrobu CMC je vhodné používat vlákna stabilní i při vysokých teplotách, jelikož běžná polymerní a skleněná vlákna se při teplotách nad 500 °C, respektive 700 °C rozkládají, a proto se nepoužívají jako výztuže pro kompozitní materiály s keramickou maticí, které často nacházejí uplatnění v prostředích s extrémními podmínkami. Nejčastěji používanými výztužemi v CMC jsou vlákna na bázi SiC, Al₂O₃, Si₃N₄, AlN a dalších látek. [2][20]

3 Adheze v kompozitech

Adhezí se rozumí vzájemné působení mezimolekulových a meziatomárních sil na rozhraní dvou povrchů. Mechanismus adheze nelze jednoduše popsat jedinou metodou, jelikož pevnost adhezního spoje bude ovlivňovat např. chemická struktura látek, reologické vlastnosti, struktura povrchu látek a další parametry, které se v současné době zkoumají. [19] V kompozitních materiálech budou výsledné vlastnosti ve velké míře záviset na vzájemné „spolupráci“ mezi disperzní fází a matricí. Zejména mechanické vlastnosti jsou ovlivňovány velikostí adhezních sil na rozhraní matrice-plnivo. [2] Pro vznik silného adhezního spoje je nutné dobré smáčení povrchu částice nebo vlákna. Z termodynamického hlediska by proces smáčení měl probíhat snadno, jelikož povrchové energie tavenin polymerů jsou značně menší oproti povrchovým energiím disperzních složek. [12]

Tabulka 6 - Povrchové energie některých polymerů [12]

Polymer	[mJ.m ⁻²]
Poly(hexafluorpropylen)	16,2 - 17,1
Poly(tetrafluorethylen)	18,5
Poly(dimethylsiloxan)	24
Polypropylen	29
Polystyren	33
Polyethylen	35
Polyvinylalkohol	37
Polyamid 6,6	45

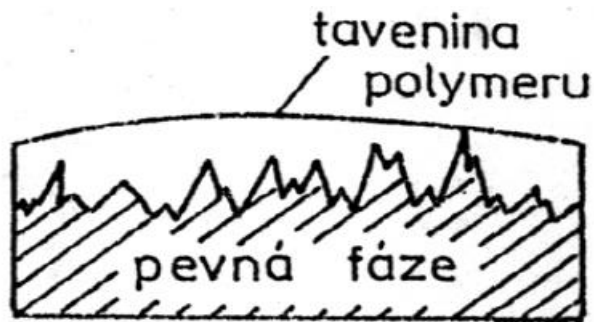
I přes nízké hodnoty povrchového napětí polymerů je dobré smáčení neupravených částic velmi obtížné, v důsledku vysoké viskozity tavenin polymerních látek. Vysoká viskozita způsobuje, že tavenina nedokáže proniknout do všech prohloubenin na povrchu částice, ve kterých následně vznikají vzduchové bubliny, které působí jako koncentrátoři napětí a iniciátory lomu. Povrch plniva je proto potřeba ve většině případů upravit a pro zvýšení adheze mezi matricí a plnivem se využívají tyto dva postupy [12]:

- Použití kopolymerů obsahujících kyselé nebo bazické funkční skupiny. „Příkladem jsou kopolymery propylenu s kyselinou akrylovou nebo s maleinanhydridem, které vytvářejí na jedné straně acidobazické vazby s bazickými plnivy, na druhé straně se zabudovávají do semikrystalické matrice polypropylenu.“ [12]
- Použití reaktivních kapalných nanosů. Přítomnost určitých funkčních skupin na povrchu plniva rozhoduje o potřebné povrchové úpravě. Na kyselých plnivech, obsahujících

např. hydroxylové skupiny, je vhodné použít silanová vazebná činidla a naopak povrch bazických plniv se upravuje např. mastnými kyselinami. [12]



Obrázek 4 - Příklad špatného smáčení povrchu částice polymerní taveninou [12]



Obrázek 5 - Příklad dobrého smáčení povrchu částice polymerní taveninou [12]

Důležitým parametrem charakterizujícím pevné spojení hraniční fáze mezi plnivem a polymerem je schopnost přenášet napětí z polymerní matrice na plnivo i za zvýšené teploty a zároveň zvyšování houževnatosti kompozitu absorpcí mechanické energie. [12]

Mechanismy adheze se v současné době rozdělují do tří základních skupin, kdy na rozhraní mezi disperzní fází a matricí mohou působit adhezní síly fyzikální povahy, chemické a fyzikálně chemické povahy nebo mechanické zaklínění mezi jednotlivými složkami kompozitu. [2][19]

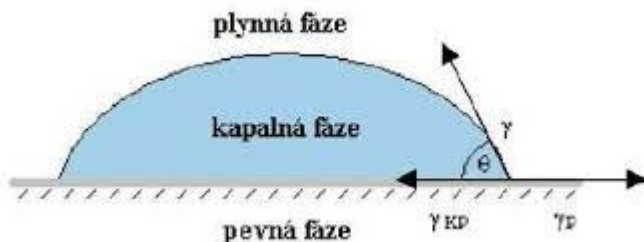
3.1 Mechanické zaklínění

Neupravený povrch částic a vláken je plný malých hrbolků a prohloubenin, které po dokonalém smáčení taveninou polymeru vytvoří pevný adhezní spoj (viz obrázek 5). Právě tyto malé výčnělky na povrchu plniva budou zajišťovat, že nedojde k usmyknutí plniva v matrici. Větší

počet nerovností na povrchu částic a dokonalejší vzájemný styk s matricí budou odpovídat za lepší zaklínění složek kompozitního materiálu. Soudržnost mezi spojitou a nespojitou fází bude dále zvyšována přítomností třecích sil na jejich vzájemném rozhraní. Třecí síly budou vznikat při každém silovém působení na kompozit. V důsledku větší působící síly (např. tahového napětí) budou vznikat i větší třecí síly, které je třeba překonat pro narušení struktury společného rozhraní matrice-plnivo. [2]

3.2 Fyzikální adheze

Je spojena s působením Van der Waalsových sil mezi plnivem a matricí. Jedná se o sekundární vazby, mezi které lze zařadit Londonovy síly, vodíkové můstky a Coulombovské síly. Vznik vazebného spojení je podmíněn těsným kontaktem mezi složkami a odpovídá teoretické pevnosti rozhraní 0,7 až 7 GPa. Dobrou adhezi ovšem nezaručuje pouze samotný blízký kontakt složek vzhledem k přítomnosti defektů, trhlin a vzduchových bublin na povrchu částic. Smáčivost tedy značně ovlivňuje působení fyzikálních sil na rozhraní a je možné ji charakterizovat s využitím povrchové energie nebo povrchového napětí. [2][19]



Obrázek 6 - Základní schéma smáčivosti pevného povrchu kapalinou [37]

Povrchové napětí lze popsat s využitím některého ze schémat smáčivosti. „Základní charakteristikou je tzv. úhel smáčivosti θ . Pokud při zvětšování povrchu mezi pevným a kapalným prostředím dochází ke snižování celkové povrchové energie, má kapalně prostředí tendenci tento povrch co nejvíce zvětšit. To se projeví tím, že úhel θ bude mezi 0 a 90 stupni. O takových dvou látkách mluvíme jako o vzájemně smáčivých. V opačném případě, pro úhel θ mezi 90 a 180 stupni, mluvíme o látkách vzájemně nesmáčivých.“ [2] Pro úhel blízký se 180 stupňům, bude kapalina tvořit na povrchu plniva malé kuličky a nebude smáčet povrch, naopak pro úhel $\theta = 0$ stupňů bude kapalina tvořit tenkou vrstvu, která bude dokonale kopírovat povrch plniva. [2] Úhel smáčení závisí na vnějších podmínkách a lze jej ovlivnit například teplotou.

Změnou teploty se může částečná smáčivost povrchu pevné látky přeměnit na smáčivost úplnou. [18]

Povrch částic není vždy hladký, nacházejí se na něm různé výčnělky a prohloubeniny, které ovlivňují smáčivost. Je proto vhodné zavést faktor drsnosti D , který vyjadřuje poměr velikosti skutečného povrchu a velikosti povrchu ideálně hladkého. [2]

$$\cos(\theta_{drsné}) = D * \cos(\theta_{ideální})$$

Pro všechny pevné látky lze určit tzv. kritické povrchové napětí. Kapaliny s větším povrchovým napětím než je kritické povrchové napětí pevné látky, nebudou povrch této látky smáčet. Naopak roztoky nebo taveniny s nižší hodnotou povrchového napětí povrch smáčet budou. [2]

Tabulka 7 - Kritická povrchová napětí některých materiálů [2]

Látka	Plast	Sklo	Keramika	Kov	Org. látka
γ_k [N/m]	20 - 30	80 - 100	100 - 1000	400 - 2000	500 - 5000

3.3 Chemická adheze

Chemické vazby vznikající mezi plnivem a matricí mají značně vyšší pevnost oproti Van der Waalsovým interakcím. Teoretická pevnost rozhraní dosahuje hodnot 7 až 70 GPa. Chemické vazby vznikají v důsledku dvou odlišných procesů. Pokud dochází mezi spojitou a nespojitou fází k chemické reakci, vznikne na rozhraní vrstva sloučeniny, která bude působit jako silný adhezní spoj. V druhém případě charakterizuje přítomnost chemických vazeb difuzní mezivrstva, která se vytvoří při vzájemném pronikání plniva do matrice. [2] Jedna z teorií zabývající se chemickou adhezí uvádí, že existuje určitý maximální počet chemických vazeb na rozhraní matrice-disperze, při kterém adhezní spoj dosahuje maximální pevnosti. Jakmile počet chemických vazeb překročí tuto hranici, vyšší koncentrace mechanických pnutí na rozhraní způsobí snížení pevnosti adhezního spoje v důsledku silnějšího mezifázového efektu. [19] S chemickou adhezí mohou být spojeny i určité negativní efekty: mezivrstva chemické sloučeniny může být někdy velmi křehká a při silné difuzi plniva do matrice dochází ke značnému poklesu objemového zlomku plniva. Tyto nepříznivé okolnosti většinou negativně ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitu. [2]

4 Polymerní kompozitní materiály ve stavebnictví

4.1 Nátěrové hmoty

Nátěrovou hmotu (NH) lze chápat jako materiál, který má většinou povahu kapaliny, pasty nebo prášku. Pokrytím povrchu (např. dřeva, kovu nebo betonu) nátěrovou hmotou dojde k vytvoření filmu, který plní několik funkcí:

- chrání podklad před vlivy povětrnosti a ultrafialovým zářením, které způsobuje degradaci zejména polymerních látek (např. polystyrenu jako tepelné izolace)
- obarvuje podklad, plní dekorativní funkci

NH se skládají z několika základních složek, mezi které lze zařadit:

- pojiva – základní složky, které v největší míře definují vlastnosti NH, zajišťují dobrou přilnavost k podkladu. V závislosti na typu natíraného podkladu se volí různé druhy pojiv, z polymerních látek se nejčastěji jedná o akrylátové disperze, polyuretany a alkydové, epoxidové nebo polyesterové pryskyřice.
- pigmenty a barviva – organické nebo anorganické látky, které dávají nátěrovým hmotám barevný odstín.
- rozpouštědla – převádějí pojivo do formy roztoku (např. voda).
- aditiva – pomocné látky, které zlepšují vlastnosti NH a umožňují jejich snadnější přípravu.
- plniva – vyskytují se nejčastěji ve formě pevných částic. Ovlivňují mechanické vlastnosti, odolnost nátěrového filmu vůči vodě. Baryt, mastek, kaolin, křída a křemelina se řadí mezi nejvýznamnější. [27]

Mezi NH, ve kterých funkci pojiva zastupuje polymerní látka, lze zařadit např. akrylátové barvy, silikonové barvy, polyuretanové nebo také polyesterové barvy. Nátěrové hmoty se ve stavebnictví používají k nátěrům vápenocementových omítek, zdíva, dřevěných desek, papíru, strukturních tapet, kovových předmětů, betonových panelů a panelů z lehčených hmot. [28]

4.2 Podlahové krytiny

Podlaha je konstrukce, která se skládá z jedné nebo několika vrstev. Nášlapná vrstva tvoří horní povrch podlahy, roznášecí vrstva roznáší působící zatížení na větší plochu podlahy a izolační vrstva odděluje konstrukci podlahy od ostatních stavebních konstrukcí. Přestože se podlahy

kladou na různé typy povrchů, měly by vždy vykazovat: mechanickou odolnost, odolnost vůči zvýšeným teplotám, vlhkosti a chemikáliím, materiály používané pro jejich výrobu by měly být hygienicky nezávadné a podlahy by také měly splňovat požadavky na tepelnou a zvukovou izolaci. Podlahové krytiny se v dnešní době vyrábějí z různých materiálů, z polymerních látek to jsou např. vinylové plasty, ze kterých se nejčastěji používá polyvinylchlorid (PVC). Při výrobě PVC se do polymerní směsi přidávají různé pomocné látky a plniva (např. křemičitý písek, kaolin nebo mastek), které zlepšují užité vlastnosti polymeru a usnadňují jeho zpracování. Široce používanými krytinami jsou také laminátové podlahy. Laminát je materiál, který se skládá z několika vrstev stejného nebo různého materiálu vzájemně spojených pojivem. Jedná se vlastně o kompozitní materiál, kdy spojením několika vrstev z různých materiálů nejčastěji polyesterovou, vinylesterovou nebo fenolovou pryskyřicí vznikne podlahová krytina, která má lepší vlastnosti než podlahovina zhotovená pouze z jednoho typu materiálu. [29][30]

4.3 Izolační hmoty

Z polymerních látek se ve stavebnictví pro fasádové izolace využívá nejčastěji pěnový nebo extrudovaný polystyren a v druhé řadě se uplatňují také pěnové polyuretanové desky. Izolační materiály se vyznačují nízkou tepelnou vodivostí a jejich hlavním úkolem při izolacích staveb je proto zabránit úniku tepla, např. z budov, potrubí apod. Klíčovou roli sehrávají malé bublinky vzduchu, které vznikají v průběhu výroby polystyrenových bloků, a nacházejí se v celém jejich objemu. Vzduch, který se ve formě bublinek „nemůže“ pohybovat, potom působí jako výborný tepelný izolant. [31] Polystyren je často používaným materiálem ve stavebnictví a je proto snaha stále zdokonalovat jeho vlastnosti přidávkou různých pomocných látek a plniv. V závislosti na typu polystyrenu a obsahu plniva je většinou přidávkem tzv. nanoplňiv dosaženo lepších vlastností výsledného polystyrenu v porovnání s neplněným PS. Vzniklý nanokompozit má vyšší pevnost v tahu, modul pružnosti, ale také větší rozměrovou stabilitu a větší odolnost vůči působení UV záření. Nanoplňiva rovněž snižují hořlavost polystyrenových plastů a slouží jako náhrada za běžně používané retardéry hoření. V porovnání s konvenčně používanými zhášedly méně zatěžují životní prostředí. Využívanými jílovými plnivými jsou např. MMT nebo Halloysite. [32]

4.4 Vyztužující prvky

Vláknové polymerní kompozity (VPK) se v posledních desetiletích začaly stále častěji používat jako alternativní materiál pro zpevnění např. betonových konstrukcí místo stávající oceli. VPK vykazují vysokou odolnost vůči působení koroze, vysokou pevnost, mají nižší hustotu oproti oceli, relativně nízké náklady na údržbu a další výhody. Nacházejí využití také jako vyztužující prvky v dřevěných, ocelových a zděných konstrukcích. Matrice VPK jsou nejčastěji na bázi termoplastů nebo reaktoplastů. Vlákna zvyšující pevnost a houževnatost polymerní matrice jsou obvykle skleněná, aramidová nebo uhlíková. Typ vláken se většinou volí podle odvětví stavebnictví, ve kterém bude daný materiál používán. [21][22][33] Typickým použitím VPK může být např. vyztužení betonových pilířů nebo nosníku deskami, popřípadě tkaninou zhotovenou z epoxidové pryskyřice, ve které jsou rozmístěná kontinuální skleněná vlákna.

4.5 Modifikované asfalty

Asfalt získaný frakční destilací ropy se používá jako materiál pro stavbu silnic už po dlouhou dobu. Výrazný nárůst počtu vozidel pohybujících se po silnicích způsobil, že v posledních desetiletích jsou asfaltové povrchy stále více zatěžovány a často i přetěžovány. V důsledku těchto okolností mají povrchy kratší životnost a je třeba vynaložit více peněz na jejich opravy. V druhé polovině dvacátého století se proto začaly k asfaltové směsi přidávat polymerní látky, které zvyšují kvalitu a odolnost povrchu vůči dlouhodobému zatížení. Přibližně 75 % všech polymerních látek přidávaných k asfaltu představují elastomery (např. butadienstyrenový kaučuk, kopolymer SBS nebo SEBS), 15 % plastomery (např. polyolefinové kopolymery) a zbylých 10 % zastupují většinou směsi polymerů. Zpravidla 3–7 hmot. % směsi tvoří příslušný polymer. Modifikované asfalty jsou v určitém smyslu netradičními polymerními kompozitními materiály. Asfalt je v nadbytku a zastupuje tedy funkci matrice, zatímco dispergovaný polymer působí v asfaltové směsi jako elastická výztuž, díky které stavební materiál získává nové lepší vlastnosti, v porovnání s nemodifikovaným asfaltem. [34][35]

4.6 Lepidla a tmely

První lepidla, nejčastěji přírodního nebo živočišného původu, začali lidé používat už v době kamenné, ale k významnému rozšíření syntetických lepidel na bázi polymerů došlo až po druhé světové válce. Lepení lze charakterizovat jako proces, při kterém se lepidlo nanáší většinou na svrchní vrstvu lepeného materiálu. Lepidlo by mělo zakrýt povrchové nerovnosti materiálu

(drobné výčnělky a prohloubeniny) a zároveň odstranit vzduchové bubliny přítomné v mikropórech. Pevnost lepeného spoje bude tedy záviset na stupni smáčivosti povrchu (interakce lepidlo-materiál), ale také na mezimolekulárních silách působících v samotném lepidle (interakce mezi molekulami lepidla). Lepidly na bázi synteticky připravených polymerů jsou např. lepidla epoxidová, polyuretanová, polyesterová, fenolformaldehydová, kaučuková, polyakrylátová a mnoho dalších druhů. Do lepidel se přidávají také různé přísady, které zlepšují výsledné vlastnosti. Z plniv jsou to např. měděné, niklové nebo stříbrné částice, oxid hlinitý, nitrid boru a další látky. [47][48][49] Dalším materiálem, často využívaným v různých stavebních oborech, jsou tmely. Tmel lze používat jako těsnicí materiál, který poskytuje ochranu před zatékáním, pronikáním plynů, hluku nebo hmyzu. Dále může tmel zastupovat funkci lepidla, tzn. že bude spojovat materiály za vzniku pevného konstrukčního spoje. Podle chemického složení lze tmely rozdělit do několika základních skupin: akrylátové tmely, silikonové, polyuretanové, butylkaučukové a tmely na bázi polymerů modifikovaných silanem. Pro zlepšení vlastností polymeru se do tmelů přidávají minerální plniva, kovové prášky, plniva na bázi dřevní hmoty, ale také fungicidní a algicidní přísady, které zabraňují vzniku plísní a zlepšují hygienické vlastnosti povrchu. [50][51][52]

5 Vláknové polymerní kompozity

Materiály používané ve stavebnictví a pro různé konstrukční účely se s postupem času neustále vyvíjí. V současnosti, kdy stavby po celém světě často nabývají enormních rozměrů, a je požadováno, aby byly dokončeny v co nejkratší době, je proto kladen velký důraz na materiály používané v těchto odvětvích. Je tedy potřeba, aby měly relativně nízkou hustotu, byly snadno zpracovatelné a proces výroby nebyl příliš nákladný. Tyto materiály by také měly vykazovat zároveň odolnost vůči vlivům povětrnosti a nežádoucímu působení zatížení, v kombinaci s minimálními nároky na údržbu. Výsledkem několika posledních desetiletí vývoje bylo vytvoření kompozitních materiálů, které se dnes používají jako stavební materiál nebo vyztužovací prvky pro různé konstrukce. Tímto kompozitním materiálem jsou FRP „Fiber reinforced polymer“ neboli polymery, ve kterých disperzní složku tvoří vlákna. Kompozity na bázi FRP se dnes používají jako materiály, které zvyšují pevnosti mostních pilířů, budov, tunelů, obrněných vozidel a podzemních infrastruktur. Vlastnosti, ke kterým lze započítat nízkou hmotnost, vysokou pevnost v tahu, odolnost proti koroznímu prostředí a odolnost proti únavě, řadí tyto kompozity mezi vysoce účinné materiály (High-performance). [21] Tyto vlastnosti, zejména pak odolnost vůči koroznímu prostředí a dobrý poměr pevnosti a hmotnosti, předurčily v posledních desetiletích FRP jako alternativní materiál pro výrobu tyčí a profilů, které slouží jako výztuže betonových staveb, místo současných ocelových výztuží. [22] Relativně nízká odolnost vůči zvýšeným teplotám nebo kolísání teplot patří mezi jedny z nedostatků VPK. Další nevýhodou jsou poměrně vysoké ceny výchozích materiálů pro konstrukční aplikace, jmenovitě polymerních matic a vlákenných výztuží. Z velkého počtu reaktoplastových a termoplastových matic, které se více či méně liší svými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, chemickou strukturou a způsobem zpracování, je potřeba vždy pečlivě zvolit vhodnou spojitou fázi, kterou ve většině případů doplňují skleněná, uhlíková, nebo aramidová vlákna. Pro různé stavební účely se tedy v současné době vyrábějí kompozity téměř na míru, aby vyhovovaly všem požadavkům zákazníků. [39][40]

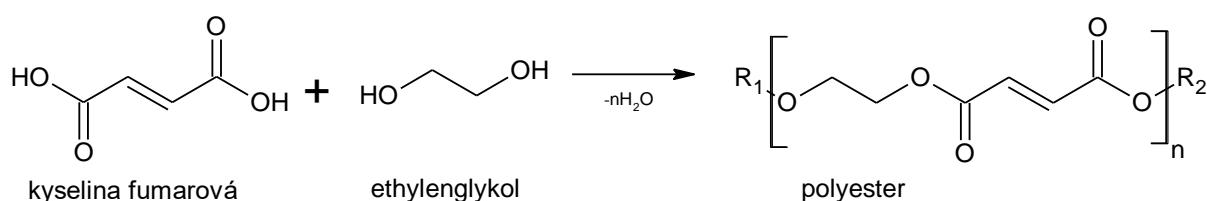
5.1 Matrice

Pro všechny typy vláken se používají stejné druhy matic, je proto lepší uvést je v oddělené kapitole, než vypisovat tytéž informace u jednotlivých typů kompozitů. Vybrat vhodnou spojitou fázi pro kompozitní materiál není vždy jednoduché, jelikož v současné době je na trhu dostupná široká paleta výrobků, které lze pro tento účel využít. Matricemi ve VPK jsou nejčastěji reaktoplasty, u kterých při zvýšené teplotě dochází k vytvrzování a vzniku

trojrozměrné sítě. V důsledku nově vzniklé vnitřní struktury nelze polymer po vytvarování a vytvrzení opětovným zvýšením teploty převést do plastického, tvárného stavu. Méně často používanými materiály jsou termoplasty, které lze opětovně tepelně zpracovávat vícekrát, na rozdíl od reaktoplastů. K polymerní směsi se obvykle přidávají také plniva a různé pomocné látky (např. UV absorbéry), které zlepšují mechanické a elektrické vlastnosti a usnadňují proces zpracování. Výsledná polymerní matrice má za úkol chránit vlákna před působením vnějších vlivů, přenášet zatížení na vlákna a spojovat je v jeden kompaktní celek – kompozitní materiál. [21][41] Nejčastěji používanými polymery, z kterých se vyrábí reaktoplastové matrice, jsou:

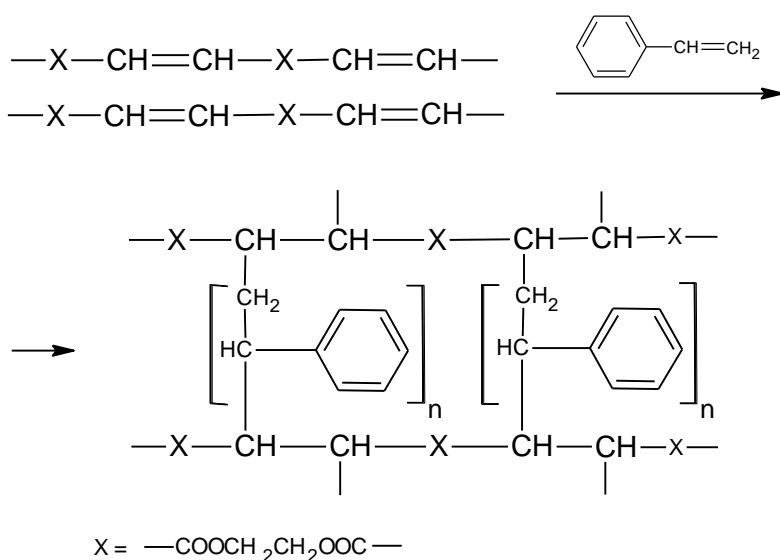
5.1.1 Nenasycené polyestery

Výroba – připravují se polyesterifikací nasycených a nenasycených dikarboxylových kyselin s dioly. Charakteristickou, pravidelně se opakující, skupinou v polymerním řetězci je esterová skupina. Nejčastěji používanými dioly jsou propylenglykol a ethylenglykol. Typickými představiteli dikarboxylových kyselin jsou např. kyselina fumarová, maleinanhidrid, ftalanhydrid nebo také kyselina tereftalová. Stupňovitá polykondenzační reakce výchozích látek obvykle probíhá v tavenině při 180 až 220 °C v inertní atmosféře. Důležitým procesem probíhajícím v tavenině během polyesterifikace je přeměna kyseliny maleinové na fumarovou, která vykazuje větší reaktivitu při reakci se styrenem. Platí, že čím více fumarátového izomeru bude směs obsahovat, tím lepší fyzikální vlastnosti bude mít vytvrzená pryskyřice. Po skončení polykondenzační reakce se produkt stabilizuje přidávkou hydrochinonu a rozpustí se v reaktivním monomeru. [15] Pro snížení viskozity taveniny a usnadnění zpracování pryskyřice se jako reaktivní rozpouštědlo využívá nejčastěji styren, který hraje důležitou roli i v procesu vytvrzování. [14] Méně často používanými rozpouštědly jsou vinyltoluen, methylmethakrylát nebo akrylonitril, které se občas používají i ve směsi se styrenem. Do polymerní směsi se přidávají také různá plniva (až do 30 hm. %), např. křemičitá moučka, kaolín, křída a další, jejichž hlavním úkolem je snížení objemového smrštění pryskyřice a ceny výsledného výrobku. [15]



Obrázek 7 - Výroba nenasyceného polyesteru reakcí kyseliny fumarové s ethylenglykolem [42]

Sítování – v závislosti na typu nenasyčené pryskyřice, rozpouštědla, množství iniciátoru a inhibitoru se budou jednotlivé procesy vytvrzování od sebe mírně odlišovat. Je důležité rovněž zmínit, že s klesajícím obsahem kyseliny fumarové ve směsi se bude doba vytvrzování a doba dosažení bodu gelace prodlužovat. Je proto vždy nutné pečlivě zvolit poměr, v jakém budou jednotlivé dikarboxylové kyseliny přítomné ve výchozí směsi. Samotný proces vytvrzování pryskyřice lze chápat jako radikálovou polymeraci dvojných vazeb styrenového monomeru s dvojnými vazbami nenasyčeného polyesteru. Jedná se vlastně o kopolymerační reakci, při které dochází k objemovému smrštění o 5 až 12 %. Iniciátory nejčastěji používanými pro síťovací reakce jsou organické peroxidy (např. dibenzoylperoxid, terc-butylperbenzoát), které ve většině případů doprovázejí urychlovače na bázi aminů a kobaltu, jež výrazně zrychlují průběh vytvrzování. Hustota vzniklé trojrozměrné sítě bude záležet především na množství reaktivního monomeru, iniciátoru a počtu dvojných vazeb přítomných v nenasyčeném polyesteru. [15]

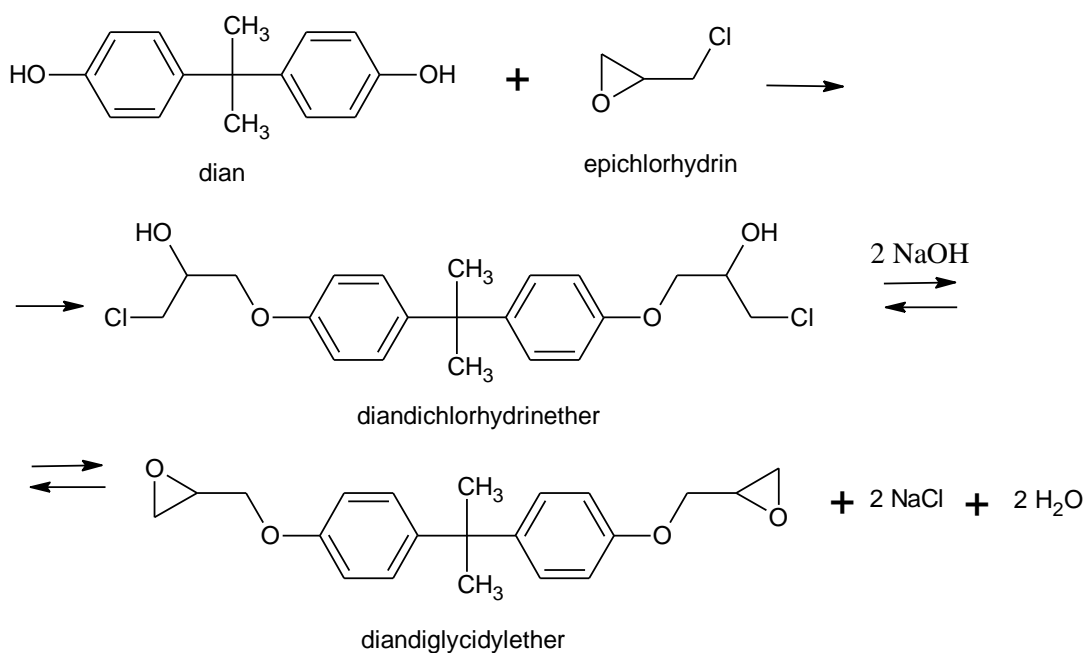


Obrázek 8 - Schéma vytvrzování nenasyčeného polyesteru reakcí s dvojnými vazbami styrenu [15]

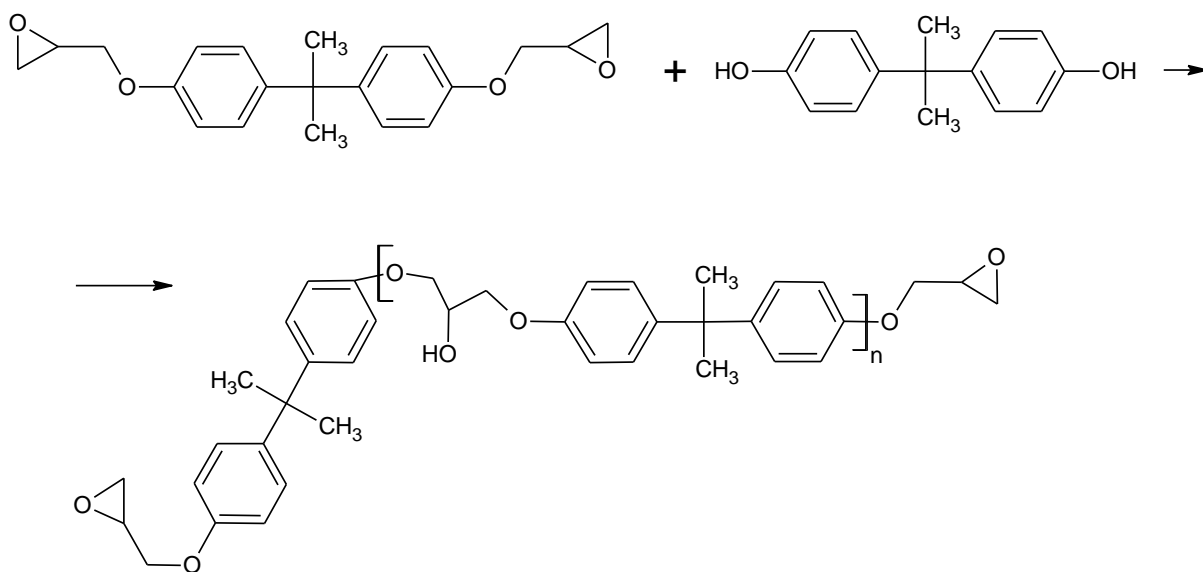
Vlastnosti – v první řadě je vhodné zmínit, že na výsledné vlastnosti pryskyřice bude mít vliv množství a druh dikarboxylové kyseliny a polyalkoholu, typ a množství tvrdidla a v neposlední řadě také molekulová hmotnost polyesteru. Obecně lze ale prohlásit, že vytvrzené nenasyčené polyestery vykazují dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, odolnost vůči působení olejů, vody, uhlovodíků a dalších látek. Při použití nekonvenčních kyselin a polyalkoholů se pryskyřice vyznačují také tvarovou stálostí za tepla a vyšší odolností vůči povětrnosti. [15]

5.1.2 Epoxidové pryskyřice

Výroba – EP představují skupinu reaktoplastů, které se vyznačují širokou paletou výrobků. Ve svých molekulách obsahují vždy velký počet epoxidových (oxiranových) skupin. EP se v zásadě rozdělují do dvou základních skupin, pryskyřice obsahující glycidylové nebo epoxidové skupiny. Pryskyřice glycidylového typu se nejčastěji vyrábějí kondenzací epichlorhydrinu s 2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propanem (až 85 % světové produkce), nazývaným krátce bisfenol A nebo dian. Samotná kondenzace se skládá z dvou hlavních kroků: nejdříve v alkalickém prostředí probíhá reakce hydroxylové skupiny bisfenolu A s oxiranovou skupinou epichlorhydrinu, následně se ze vzniklých chlorhydrinetherů odštěpuje chlorovodík za vzniku epoxidových skupin. Opakovanou kondenzací (polykondenzací) monomerů ve směsi budou vznikat vysokomolekulární látky. K přípravě polymeru lze také využít reakce nízkomolekulární pryskyřice s bisfenolem A, která probíhá při teplotě 150 až 180 °C v inertní atmosféře, přičemž výsledná pryskyřice dosahuje střední molekulové hmotnosti přibližně 340 až 3800 (obrázek 10). Katalyzátorem reakce je nejčastěji některá z bazických sloučenin. [15]



Obrázek 9 - Kondenzace bisfenolu A s epichlorhydrinem [15]



Obrázek 10 - Vznik vysokomolekulární epoxidové pryskyřice reakcí nízkomolekulární EP s dianem [15]

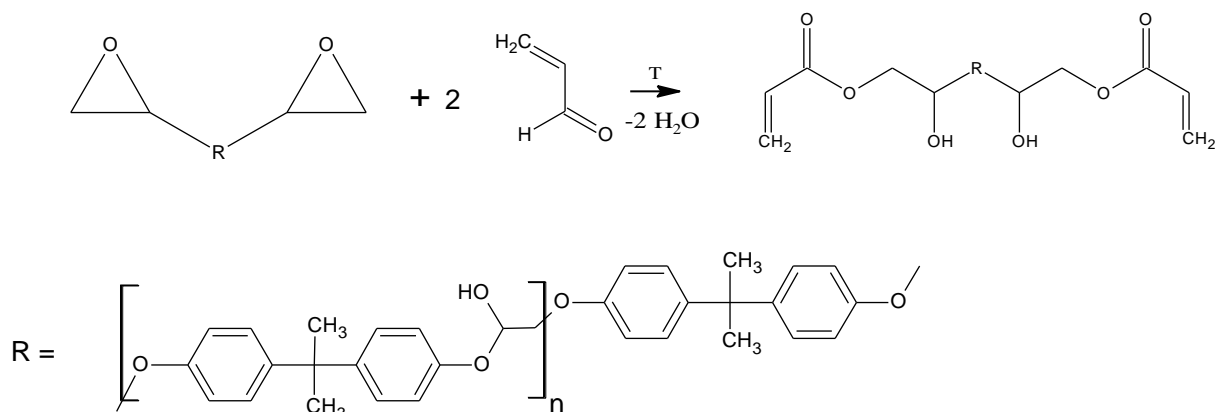
Sít'ování – k vytvrzování EP se nejčastěji využívá polyaminů nebo anhydridů polykarboxylových kyselin. Za vznik trojrozměrné sítě bude odpovídat především reakce tvrdidla s epoxidovými a hydroxylovými skupinami, nebo také samotná polymerace epoxidových skupin. Při použití polyaminů jako sít'ující složky je třeba dbát na to, aby zvolený polyamin obsahoval ve své molekule alespoň 3 aktivní atomy vodíku. Primární a sekundární alifatické polyaminy (např. triethylentetramin, isoforondiamin) jsou schopny vytvrzovat EP za pokojové teploty během relativně krátké doby. K vytvrzování se používají také aromatické polyaminy (např. m-fenylendiamin nebo 4,4'-diaminodifenylsulfon), které na rozdíl od alifatických polyaminů dávají konečným výrobkům větší tvarovou stálost za tepla, vyšší mechanickou pevnost a také větší odolnost vůči chemikáliím. Vytvrzování aromatických diaminů s pryskyřicemi probíhá většinou při vyšších teplotách (kolem 100 až 150 °C) po dobu několika hodin. Druhou důležitou skupinou tvrdidel jsou sít'ovací činidla na bázi anhydridů. K anhydridům se často přidávají také urychlovače (0,2 až 2 hmot. %), které výrazně snižují potřebné množství tvrdidla, pro dokonalé vytvrzení pryskyřice. Proces vytvrzování probíhá zpravidla při 100 až 200 °C i několik hodin. Zástupci této skupiny činidel jsou např. ftalanhydrid nebo Nadic anhydrid. [15]

Vlastnosti – vytvrzené EP vykazují velmi dobrou adhezi ke kovovým, skleněným, keramickým a dřevěným povrchům. Mají dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, vykazují také

odolnost proti koroznímu prostředí, vyšším teplotám a chemikáliím, především vůči alkalickým roztokům. Výhodou oproti nenasyceným polyesterům je menší smršťivost při vytvrzování. Charakteristickou vlastností je rovněž nízká absorpce vlhkosti, při ponoření do kapaliny. [15][21][41]

5.1.3 Vinylesterové pryskyřice

Výroba – VEP se vyrábějí stupňovitou, polykondenzační reakcí epoxidových pryskyřic s nenasycenými karboxylovými kyselinami, např. akrylovou nebo methakrylovou kyselinou. V průběhu kondenzace je nutné striktně udržovat konstantní teplotu směsi, jelikož i malé odchylky mohou iniciovat nežádoucí vedlejší reakce, které budou mít negativní vliv na výsledné vlastnosti pryskyřice. [42]



Obrázek 11 - Výroba vinylesterové pryskyřice esterifikací [42]

Sítování – vytvrzování probíhá obdobným způsobem jako u polyesterů. Do směsi se přidává reaktivní monomer spolu s iniciátorem na bázi peroxidů. Radikálovou reakcí dochází ke spojování dvojných vazeb reaktivního rozpouštědla s dvojnými vazbami VEP, které se ale nacházejí pouze na koncích řetězce. [42] Pro dosažení větší pevnosti matrice je potřeba proces sítování podpořit zvýšenou teplotou. [14]

Vlastnosti – VEP mají podobnou vnitřní strukturu jako polyester, ale obsahují menší množství esterových vazeb a reaktivní místa se nacházejí pouze na koncích makromolekulárních řetězců. Vykazují průměrné mechanické vlastnosti, lepší než polyester, ale horší než epoxidové pryskyřice. Esterové vazby přítomné v řetězci se snadno hydrolyzují, ale protože vinylestery

obsahují malé množství těchto skupin, poměrně dobře odolávají vodě a chemicky agresivním prostředím. Zejména odolnost vůči koroznímu prostředí činí tyto polymery často využívané jako matrice v kompozitních materiálech. [14]

Z dalších polymerů, které patří do skupiny reaktoplastů a také se používají pro polymerní matrice, lze vyjmenovat:

- fenoplasty – v průběhu polymerace dochází k uvolňování formaldehydu, který má negativní vliv na užité vlastnosti matrice.
- polyuretany
- aminoplasty

Pro konstrukční účely se ale tyto reaktoplasty nepoužívají příliš často. Běžné termoplastické polymery (např. PP, PE, PS) nacházejí uplatnění v kompozitních materiálech jen zřídka. Avšak vysoce účinné termoplastické polymery na bázi PEEK, PEKK, PEI vykazují vysokou odolnost vůči zvýšeným teplotám a v kombinaci s vláknennou výztuží vytvářejí materiál vhodný pro moderní letecký průmysl. Ve stavebnictví ale stále klíčovou roli zastupují reaktoplastové matrice. [41]

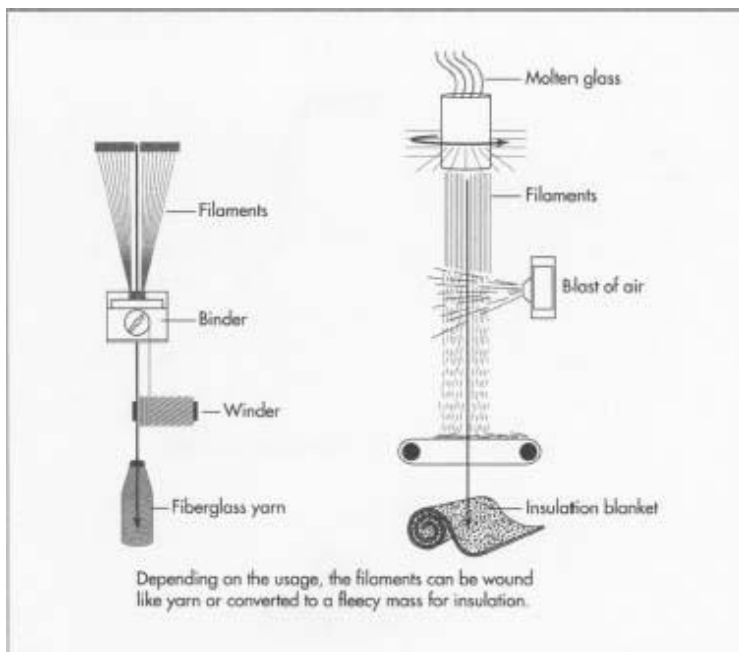
5.2 Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

Následující text se bude věnovat především polymerním kompozitům, které se používají jako vnější nebo vnitřní výztuže pro betonové konstrukce. Jednou ze tří nejčastěji používaných variant jsou polymerní matrice vyztužené skleněnými vlákny (GFRP). V důsledku široké palety různých typů skel a skvělých vlastností, které skleněná vlákna poskytují svým výrobkům, jsou tyto kompozity často používanými výztužemi betonových staveb.

5.2.1 Výroba kontinuálních skleněných vláken

Základními surovinami pro výrobu jsou zejména oxid křemičitý, uhličitán vápenatý a uhličitán sodný. Hlavním úkolem uhličitánů, které se přidávají v menších množstvích, je především snížit teplotu tání směsi, zatímco křemenný písek je hlavní složkou vznikajícího skla. V závislosti na požadavcích, které jsou kladeny na vznikající vlákna, se do směsi přidávají také další látky, např. borax, který zvyšuje chemickou odolnost nebo oxid olovnatý, který dává sklu

větší pružnost a další látky. Před samotným roztavením je žádoucí výchozí směs dobře promíchat. Nejdříve se směs dává do pece, kde dochází k tavení. Aby z roztaveného skla mohly vzniknout vlákna, je nutné udržovat teplotu taveniny přibližně na 1370 °C. Roztavené sklo dále vstupuje do tvarovacího zařízení, kde prochází vyhřívanými zvláknovacími tryskami a vychází ve formě tenkých vláken. Tyto tenké prameny jsou následně zachyceny vysokorychlostním navíječem, který je schopen navinout až 3 km vláken za minutu. Jelikož navíječ se otáčí velkou rychlostí a vlákna vystupují z trysek jen velmi pomalu v porovnání s rychlostí navíječe, dochází v důsledku působícího napětí k velkému prodloužení vláken a výraznému zmenšení průměru jednotlivých pramenů. Vlákno je následně opatřeno ochranným pojivem, které zabraňuje jeho zlomení při dalším zpracování a navinuto na trubku nebo zformováno do podoby příze. Na povrch skleněných vláken se většinou nanáší lubrikanty, které zaručují zvýšenou oděruvzdornost materiálu, pak také antistatické prostředky, jejichž hlavním úkolem je zabránit vzniku statické elektřiny na povrchu vlákna a zvýšit odolnost vůči korozi. Povrch vláken, která se budou dále používat jako výztuže do kompozitních materiálů, se navíc opatřuje souvislou vrstvou látky, která zvyšuje přilnavost k jinému materiálu. [43]



Obrázek 12 – Schéma výroby kontinuálních skleněných vláken (obrázek vlevo) [43]

5.2.2 Vlastnosti

Výsledné vlastnosti kompozitního materiálu budou ovlivněny především typem použité matrice, druhem vláken, jejich orientací v prostoru a v neposlední řadě také objemovým zastoupením vláken vzhledem k celkovému objemu kompozitu. Jednotlivých typů sklovin je

mnoho druhů, ale v kompozitních materiálech se nejčastěji využívají skleněná vlákna typu E, S, C, ACR nebo také křemenná vlákna. Společnými znaky pro všechny typy skleněných vláken jsou: relativně nízká hustota, odolnost vůči vodě, malá odolnost vůči únavě a poměrně nízké výrobní náklady v porovnání s jinými typy vláken. [21]

Tabulka 8 - Složení skloviny vláken v hmotnostních % [11]

Oxid	sklo E	sklo S	sklo C	sklo ACR
SiO ₂	52-56	65	64-68	64
Al ₂ O ₃	12-16	25	3-5	1
CaO	16-25	-	11-15	5
MgO	0-5	10	2-3	-
TiO ₂	-	-	-	3
ZrO ₂	-	-	-	13
B ₂ O ₃	5-10	-	4-6	-
Na ₂ O, K ₂ O	<0,8	<0,3	až 10	14

Nejlevnější ze všech skleněných vláken jsou vlákna ze skloviny E, které, jak název naznačuje, se velmi často používají v elektrotechnickém průmyslu. Vykazují dobré mechanické vlastnosti, malé dielektrické ztráty, jsou nevodivá. Hlavními složkami tvořící tento typ skla jsou oxidy křemičitý, hlinitý, vápenatý a boritý. Vlákna typu C mají menší pevnost a jejich mechanické vlastnosti se výrazně zhoršují se zvyšující se teplotou. Sklovinu typu C ale charakterizuje zejména výborná odolnost vůči kyselému prostředí. Vlákna obsahují větší procento křemíku a alkalických oxidů. Vlákna ze skloviny S nacházejí uplatnění zpravidla v kompozitních materiálech s epoxidovou matricí. V porovnání se sklovinou třídy E vykazují větší modul pružnosti a pevnost v tahu a také vyšší teplotu tavení. Nutnost vyhřívat pec do vyšších teplot se odráží na vyšší ceně těchto vláken. Sklovina se skládá především z oxidu křemičitého, oxidu hlinitého a oxidu hořečnatého. V prostředí s vysokým obsahem alkálií je účelné použít vlákna typu ACR, které vykazují značnou odolnost vůči alkalickým látkám. [11]

Tabulka 9 - Mechanické vlastnosti vybraných skleněných vláken [21]

Označení skla	Hustota [g/cm ³]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Prodloužení do přetržení [%]	Koeficient teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ /°C]
E	2,5	3450	72,4	2,4	5
S	2,5	4850	85,5	3,3	2,9
C	2,5	3300	69	2,3	-
AR	2,27	1800-3500	70-76	2,0-3,0	-

5.3 Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Uhlíková vlákna jsou druhým velmi často používaným typem výztuže. V kombinaci s vhodnou polymerní látkou vytvářejí materiál vhodný pro použití v různých stavebních oborech. V krystalu grafitu jsou atomy uhlíků uspořádané ve vrstvách. Jednotlivé vrstvy na sebe působí jen slabými Van der Waalsovými silami, ale ve vrstvách (tzv. „aromatických rovinách“) jsou atomy uhlíku spojeny pevnými kovalentními silami a jsou schopny odolávat velkému zatížení, které působí ve směru rovnoběžném s rovinou vláken. V uhlíkových vláknech jsou aromatické roviny uspořádané nejčastěji rovnoběžně s podélnou osou vlákna a poskytují tak materiálu vysokou pevnost a tuhost. [13]

5.3.1 Výroba uhlíkových vláken

V současné době se uhlíková vlákna vyrábějí nejčastěji z polyakrylonitrilových (PAN) vláken (až 90 % všech vláken), dále z fenol-aldehydových vláken a také ze sulfonovaného polyethylenu a ligninu. Při výrobě z PAN se k výchozí směsi přidává navíc monomer kyseliny methakrylové, který plní funkci katalyzátoru reakce, a ze vzniklého kopolymeru se zvláknováním z taveniny připravují vlákna. Proces zpracování PAN vláken na uhlíková se dále skládá z několika kroků:

- Stabilizace – oxidace a stabilizace PAN vlákna na vzduchu probíhá 1 – 2 hodiny při teplotách 200 – 300 °C za současného působení tahového napětí. Nastává zesítnění polymeru kyslíkovými můstky a vlákno se stane netavitelné.
- Karbonizace – dochází ke vzniku uhlíkových vláken. Z prekursoru se odstraňuje vodík, snižuje se obsah kyslíku a dusíku a výsledné vlákno obsahuje ve své struktuře 80 až 95 % uhlíku. Celý proces se provádí v inertní atmosféře, nejčastěji v dusíku, při 1200 – 1500 °C po dobu 30 až 60 vteřin.
- Grafitizace – dále se zvyšuje obsah uhlíku, přičemž dochází k jeho přeměně na grafit. Vznikají dokonalejší mikrokrystaly, které zvyšují výslednou tuhost vlákna, ale snižují jeho pevnost. Reakce probíhá v inertní atmosféře 15 až 20 vteřin při teplotách 2000 – 3000 °C.

Na závěr je vhodné vždy vlákna povrchově upravit, aby se dosáhlo lepší adheze k matrici, došlo k omezení adsorpce plynů na povrch vláken a zamezilo se abrazi mezi sousedními vlákny.

[2][13]

5.3.2 Vlastnosti

Vlastnosti uhlíkových vláken jsou značně ovlivněny anizotropií jejich materiálu. Ve směru rovnoběžném s osou vláken vykazují vysoký modul pružnosti a pevnost v tahu, ale ve směru kolmém se tyto vlastnosti výrazně zhoršují. Mají asi desetinásobně větší tuhost než skleněná vlákna, ale prodloužení při přetržení je menší. Uhlíková vlákna jsou dále charakteristická velmi malou teplotní roztažností, za určitých podmínek vykazují dokonce záporný koeficient délkové teplotní roztažnosti, tzn. že při zvyšování teploty se vlákno bude zkracovat. Jsou elektricky vodivá, mají malou hustotu, většinou do 2 g/cm³, neabsorbují vodu a vykazují odolnost vůči působení některých chemických látek. Za nevýhody uhlíkových vláken lze pokládat anizotropii jejich vlastností a vysokou cenu, která v porovnání se skleněnými vlákny může u nejkvalitnějších výrobků dosahovat až stonásobku. Uhlíková vlákna se vyrábějí v mnoha variantách, komerčně velmi často využívanými jsou např. vysokomodulová vlákna (HM), vysokopevnostní (HT), standardní uhlíková vlákna (HS), vlákna z mezofázových smol a další. [2][11][13]

Tabulka 10 - Mechanické vlastnosti vybraných uhlíkových vláken [2]

Označení uhlíkového vlákna	Pevnost [GPa]	Youngův modul [GPa]	Prodloužení při přetržení [%]
HT	3,1	240	1,2
HM	2,1	400	0,5

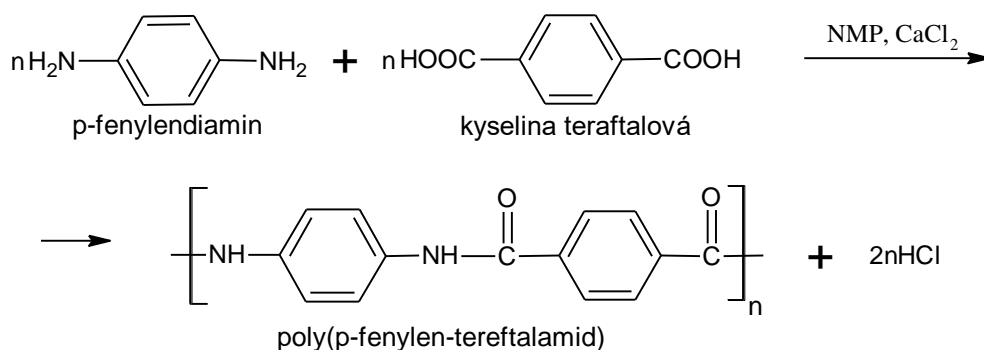
5.4 Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP)

Aramidová vlákna sloužící jako výztuže v reaktoplastových kompozitech mají v současné době důležitou roli v různých odvětvích průmyslu. [41] V laické společnosti jsou tato vlákna známější spíše pod svými obchodními názvy, např. Kevlar, Nomex, Twaron, atd. Aramidová vlákna vykazují značnou anizotropii vlastností, obvykle mají žlutou barvu a v porovnání se skleněnými vlákny mají značně vyšší cenu. [21]

5.4.1 Výroba aramidových vláken

Výrobní postupy a výchozí suroviny pro výrobu aramidových vláken se mírně liší v závislosti na typu vláken a jejich zamýšlené aplikaci v průmyslu. Aramidové vlákno pod obchodním názvem Twaron[®], které produkuje japonská firma Teijin se připravuje následujícím způsobem. Nejdříve probíhá polykondenzace kyseliny tereftalové s para-fenylendiaminem, kde používaným rozpouštědlem je N-methylpyrrolidon v kombinaci s chloridem vápenatým.

Vzniklý p-fenylen-tereftalamidový (PPTA) polymer se dále rozpouští v koncentrované kyselině sírové a roztok následně prochází zvláknovacími tryskami. Po vytlačení skrze zvláknovací zařízení kapalná vlákna procházejí vzduchovou kapsou (dochází zde k orientaci makromolekul) a vstupují do koagulační lázně obsahující vodu, kde dochází k vysrážení polymeru a vzniku pevného vlákna. Dále probíhá neutralizace, promývání, sušení a dloužení vláken, která se na závěr namotávají na role. [44]



Obrázek 13 - Polykondenzační reakce výroby poly(p-fenylen-tereftalamidu) [15][44]

5.4.2 Vlastnosti

Hlavními výhodami aramidových vláken jsou: velmi nízká hustota (většinou kolem 1,4–1,5 g/cm³), vysoká pevnost v tahu, poměrně vysoký modul pružnosti a tuhost, velká rázová houževnatost a schopnost plasticky se deformovat při působení síly kolmo na osu vlákna, tzn. že vlákna nejsou křehká. AFRP obsahují ve svých makromolekulárních řetězcích polární C=O a N-H skupiny, které snadno absorbují vzdušnou vlhkost, následkem čehož dochází ke snížení pevnosti a tuhosti vlákna. Vlákna je proto nutné opatřit ochranným povlakem, který bude zabraňovat prostupu vlhkosti. Epoxidové nebo vinylesterové pryskyřice dokonale splňují tuto funkci a v kombinaci s aramidovými vlákny vytvářejí pevný, houževnatý a zároveň málo navlhavý materiál. Další nevýhodou aramidových vláken je jejich značná citlivost vůči působení ultrafialového (UV) záření, které způsobuje degradaci materiálu. Z toho důvodu se na povrch vláken opět nanáší ochranná vrstva. [13][21][22][41]

Tabulka 11 - Mechanické vlastnosti různých druhů aramidových vláken v porovnání s polyamidovým vláknem PA66 Nylon® [13]

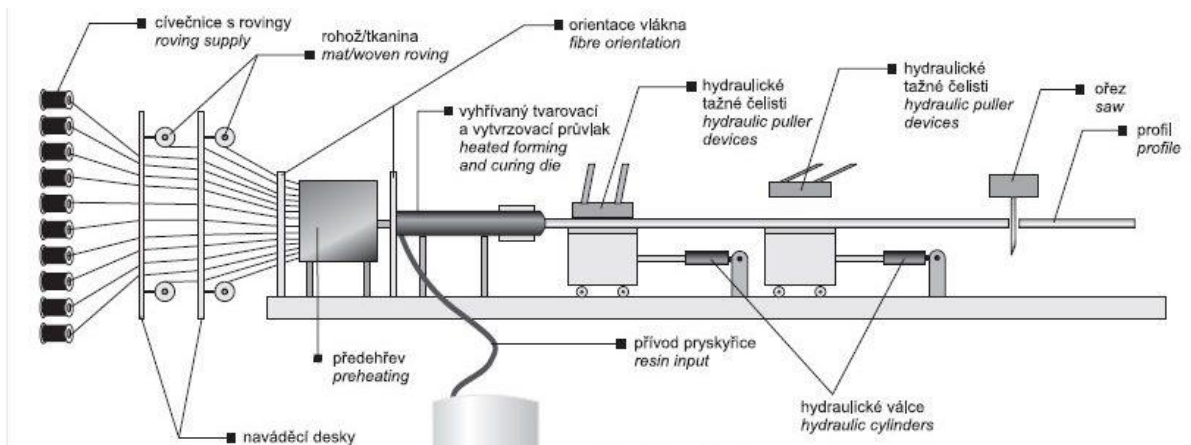
	Pevnost v tahu [MPa]	Youngův modul [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm ³]
Kevlar 29	2920	71	4	1,44
Kevlar 49	3000	112	2,5	1,44
Kevlar 149	2450	170	-	1,47
Twaron 900	2800	65	4,3	1,44
Twaron 930	3000	125	2	1,45
Nomex	700	17,3	22,6	1,4
PA66	900	5	13,5	1,14

5.5 Technologie výroby polymerních kompozitních materiálů

V současné době se kompozity s polymerní maticí vyrábí mnoha různými metodami. V závislosti na typu použité matrice a vláken, teplotě potřebné pro vytvrzení pryskyřice, výrobních nákladech a požadovaném tvaru výrobku je potřeba vždy pečlivě zvolit nejvhodnější technologii výroby. VPK, které se ve stavebnictví používají pro vnitřní nebo vnější zpevnění betonových konstrukcí, se vyrábějí nejčastěji ve formě desek, plátů, tkanin, profilů a tyčí kruhového nebo čtvercového průřezu. Metodami, které lze využít pro zhotovení výše zmíněných stavebních prvků, jsou např. stříkání, pultruze, ruční kladení, injektážní technologie nebo metoda SMC. Mezi další významné technologie výroby kompozitů lze zařadit např. odstředivé lití, odlévání, lisování, navíjení, ruční laminování a mnoho dalších metod.

5.5.1 Pultruze (tažení)

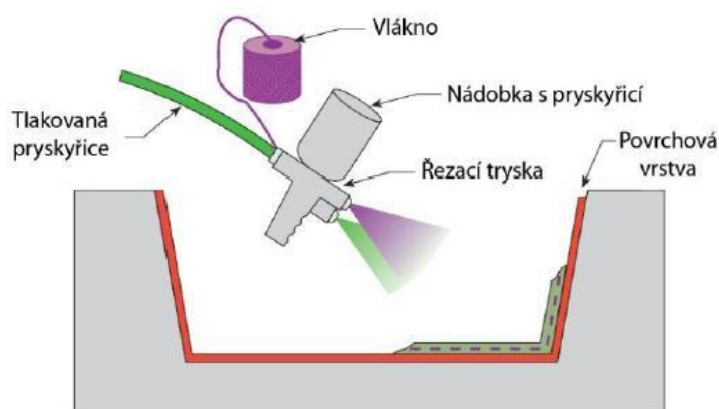
Jedná se o kontinuální proces výroby kompozitů, kterým lze vyrábět duté, plné i tvarové profily s vysokým obsahem výztuže (70-80 %). Nedílnou součástí pultruze je tažné zařízení, které umožňuje tažení plastické hmoty přes vyhřívanou formu. Na začátku jsou nejčastěji skleněná nebo uhlíková vlákna ve formě rovingu nebo plošných rohoží tažena přes srovnávací zařízení do lázně s pryskyřicí, která může navíc obsahovat plniva, katalyzátory a další přísady, které zlepšují výsledné vlastnosti profilu. Následně materiál prochází přes tvarovací formu, ve které profil získá požadovaný tvar, do vyhřívané formy, kde probíhá vytvrzování pryskyřice. Na závěr jsou profily nařezány do potřebných délek. Mezi nejčastěji používané matrice lze započítat polyesterové, vinylesterové a epoxidové pryskyřice. [23][24]



Obrázek 14 - Schéma technologie výroby kompozitu pultruzí [23]

5.5.2 Stříkání

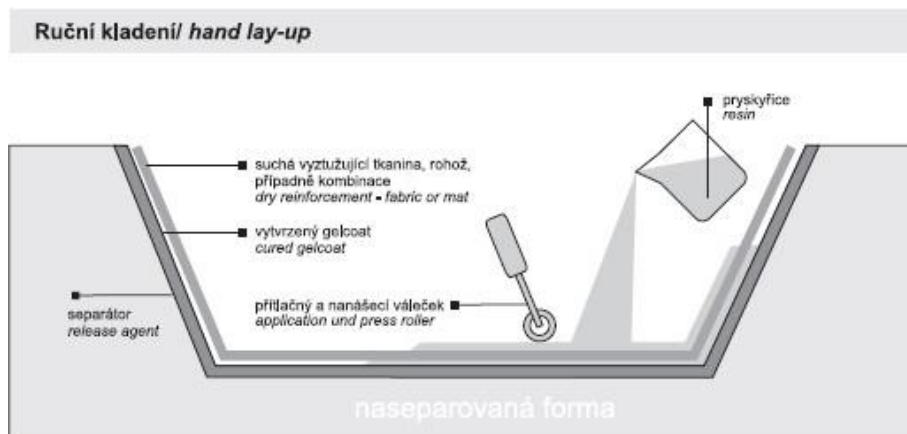
Jedná se o technologii, při které se směs pryskyřice a sekaného rovingu nebo krátkých vláken nanáší na formu prostřednictvím stříkací pistole. Stříkací aparatura je většinou ovládaná ručně, přičemž se směs obvykle nanáší v několika vrstvách. Proces stříkání je nezbytné provádět v odvětrávaném prostoru, jelikož pro tuto technologii se jako matrice používají především polyesterové pryskyřice, které obsahují jedovatý styren. Nejčastěji používanou disperzní fází jsou skleněná vlákna ve formě rovingu. Vytvrzování pryskyřice probíhá většinou za pokojové teploty. Stříkací technologie je vhodná pro výrobu středních až velkých kompozitních prvků nebo se využívá také při opravách kovových a betonových povrchů, kdy nanesená vrstva kompozitu může chránit materiál např. před korozním prostředím. Technika stříkání nachází uplatnění mezi jinými při výrobě konstrukčních prvků, jelikož možnost připravit výrobek prakticky libovolného tvaru a velikosti patří mezi velké výhody této metody. [23][24][26]



Obrázek 15 - Schéma technologie stříkání [25]

5.5.3 Ruční kladení

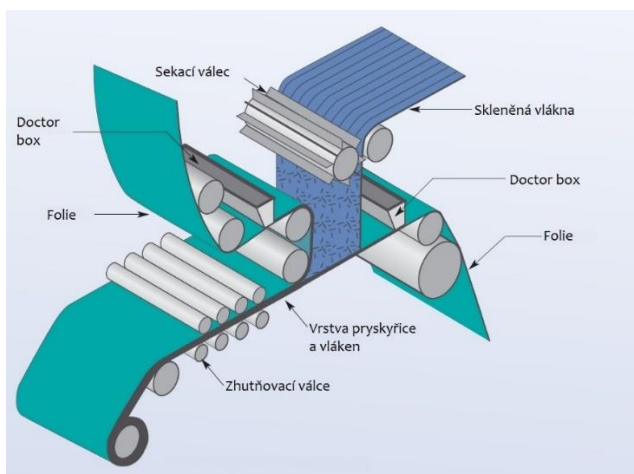
Je nejstarší a zároveň nejjednodušší metodou tvarování kompozitu ve formě. Na povrch formy se nejdříve nanese gelcoat, který zajišťuje ochranu materiálu vůči působení okolních vlivů, a po jeho částečném vytvrzení se do formy nejdříve pokládají vrstvy výztuže, které se s použitím válečku prosycují příslušným polymerem. Přebytná pryskyřice se následně odstraní a probíhá vytvrzování vzniklého laminátu. Spojitou fázi v kompozitním materiálu zpravidla zastupují polyesterové nebo epoxidové pryskyřice. Nespojitou fázi mohou tvořit uhlíková, aramidová, skleněná nebo přírodní vlákna v různých formách. Ačkoli se ruční kladení používá spíše pro malosériové výroby, nízké produkční náklady a možnost zhotovit výrobek téměř jakékoliv požadované velikosti a tvaru řadí tuto technologii mezi stále široce používanou. [23][25]



Obrázek 16 - Schéma technologie ručního kladení [23]

5.5.4 SMC (Sheet Moulding Compound)

Technologie SMC spočívá v nanášení tenké vrstvy pryskyřice na plastovou fólii, na kterou jsou dále umísťována nasekaná skelná vlákna. Na fólii s vlákny se následně přiloží z horní strany druhá plastová fólie, na které je taky nanesená pryskyřice. Vzniklý plát potom za zvýšené teploty prochází systémem válců, kde dochází k prosycení a zhutnění vláken a vytvrzení pryskyřice (nejčastěji reaktoplastové). Kompozitní materiály vyrobené technologií SMC nacházejí uplatnění např. v automobilovém průmyslu nebo ve stavebnictví. [24]



Obrázek 17 - Schéma výroby kompozitů metodou SMC [24]

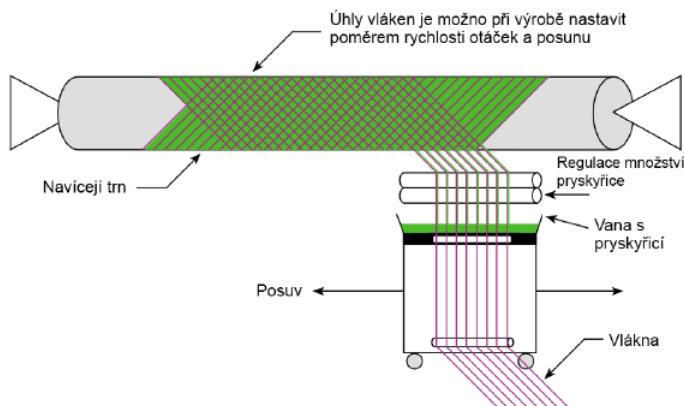
5.5.5 Injektážní technologie – vysokotlaké RTM vstříkovaní

Metoda RTM (Resin Transfer Moulding) se řadí mezi uzavřené technologie, při kterých dochází k omezenému úniku par styrenu do ovzduší, na rozdíl od např. technologie stříkání. Formy jsou obvykle zhotoveny z polymerbetonových nebo kovových materiálů, aby vydržely vysoké tlaky během injektáže. Suchá vlákna se nejdříve umístí do formy, na jejímž povrchu se nachází tenká vrstva gelcoatu. Forma se pak uzavře, do vstříkovací komory se vloží injektážní pistole, kterou se přivádí pryskyřice tak dlouho, dokud pojivo nezačne vytékat z kontrolních otvorů na okrajích formy. Je tak zaručeno, že ve formě nezůstanou prakticky žádné vzduchové bubliny a výztuž je prosycena v celém svém objemu. Na závěr probíhá za zvýšené teploty vytvrzování pryskyřice. Disperzní fázi mohou tvořit různé typy vláken, např. skleněná nebo aramidová. Polyesterové pryskyřice s přidavkem aditiv a katalyzátorů slouží pak nejčastěji jako pojiva pro injektážní technologie. Díky krátkým výrobním cyklům je vysokotlaké RTM vstříkovaní vhodné pro vysoko sériové výroby. [23]

5.5.6 Navíjení

Jedná se o jednu z nejrychleji se rozvíjejících metod výroby dutých kompozitních prvků, mezi které lze započítat např. trubky, nádrže a nádoby různé velikosti. Vlákna nejdříve prochází vanou s pryskyřicí, kde nastává jejich impregnace. Kontinuální výztuž je dále tažena přes regulační válce až na navíjecí trn. V závislosti na rychlosti otáčení trnu a možnosti posouvání vany s pryskyřicí i s regulačními válečky, lze vlákna navíjet na trn pod úhly v rozmezí 90° až

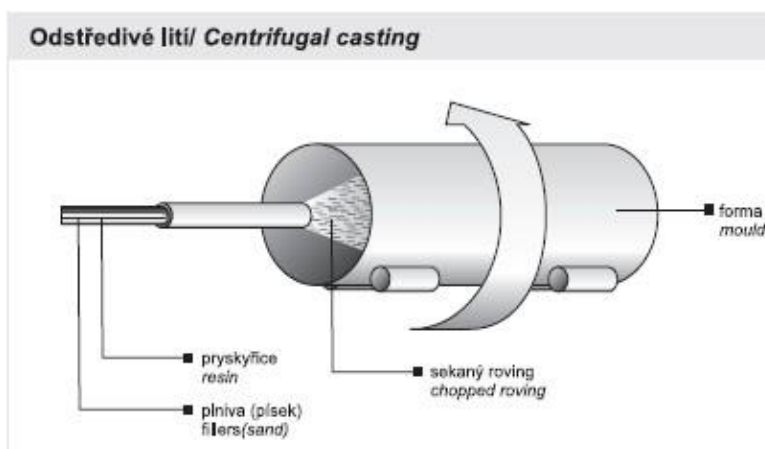
0°. Pro technologii navíjení se používají nejčastěji polyesterová, vinylesterová nebo epoxidová pojiva a z výztuží to jsou především skleněná, uhlíková nebo aramidová vlákna. [23]



Obrázek 18 - Schéma technologie navíjení [7]

5.5.7 Odstředivé lití

Další technologií vhodnou pro výrobu dutých těles, obzvláště pak potrubí určeného pro zásyp, je odstředivé lití. Zařízení se skládá z duté formy otáčející se kolem vlastní osy, v jejímž středu se nachází stříkací zařízení, které nanáší směs pryskyřice a krátkých vláken na vnitřní stěnu formy. V důsledku rychlého otáčení formy se nanášené vrstvy pryskyřičné směsi postupně zhutňují působením odstředivé síly. V posledním kroku dochází vlivem zvýšené teploty k vytvrzení a současnému smrštění kompozitu, který lze následně snadno vytáhnout z formy. Pryskyřičná směs se většinou skládá ze sekaných skleněných vláken dispergovaných v polyesterovém pojivu, které je většinou plněno směsí křemičitého písku a uhlíčitanu vápenatého. [23]



Obrázek 19 - Schéma odstředivého lití [23]

5.6 Přehled studií provádějících zkoušky na kompozitech FRP

5.6.1 Ohybové aplikace

Zevnějšek betonových nebo železobetonových (ŽB) struktur se může opatřovat FRP deskami, tenkými pláty nebo tkaninami, které zvyšují odolnost vůči ohybovému namáhání. Alternativní možností, která se také využívá, jsou FRP tyče nebo proužky, které těsně přiléhají k povrchu betonu (technologie NSM), a zvyšují tím jeho ohybovou pevnost. Podle studie Meiera et al., kteří prováděli zkoušky na malých ŽB nosnících opatřených pláty CFRP vyšlo najevo, že ohybová kapacita zpevněných nosníků se až dvojnásobně zvětšila, v porovnání s nevyztuženými nosníky. Studie Toutanjiho et al., se naopak zabývala zkoumáním počtu vrstev CFRP plátů, které slouží jako vnější výztuže ŽB nosníků, na výsledné vlastnosti materiálu. Bylo použito tři až šest vrstev CFRP profilů. Studie dospěla k závěru, že zpevněné nosníky oproti nezpevněným měly až o 170,2 % větší schopnost snášet zatížení. Zaznamenali také, že s rostoucím počtem vrstev CFRP se značně snižuje ohebnost a houževnatost betonového nosníku. Další studie (např. Fanninga a Kellyho) zkoumaly vliv délky profilů na výsledné vlastnosti nosníků. Poznatky, na kterých se shodovala většina výše zmíněných studií, které prováděly zkoušky na jednoduše podepřených nosnících, jsou: CFRP profily a pláty významně zvyšují výslednou pevnost nosníku, zatímco výztuže typu GFRP zvyšují jeho houževnatost. Studie Akbarzadeha a Maghsoudiho se zaměřovala naopak na zkoušky kontinuálních vysokopevnostních ŽB nosníků, zpevněných z vnější strany CFRP a GFRP profily. Pro oba typy profilů zkoušky prokázaly, že s rostoucím počtem vrstev plátů CFRP nebo GFRP se zvyšuje i maximální hodnota zatížení, kterou je schopen nosník vydržet, ale snižuje se jeho houževnatost a schopnost přenášet napětí. [39]

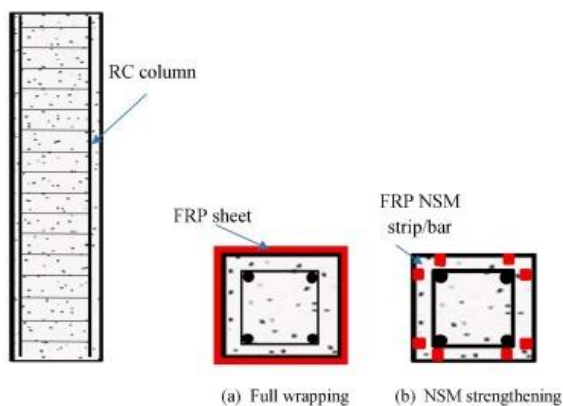
5.6.2 Smykové aplikace

Ke zvětšení odolnosti vůči smykovému namáhání se rovněž používají FRP materiály. Kompozitní materiály mají ve většině případů tvar plátů nebo širších profilů, které se nejčastěji připevňují k ŽB nosníku ze dvou protilehlých stran, nebo ze tří stran, kdy zpevňující pláty jsou uspořádány ve tvaru písmena U, nebo je celý nosník obalený vyztužujícím materiálem. Studie, kterou prováděli Carolin a Taljsten, zkoumala účinek vnějších výztuží CFRP na ŽB nosnících, které byly opatřeny kompozitem ze spodní strany a dvou bočních stran (tvar písmene U). Zkoušky nejdříve prováděli na nezpevněných nosnících, na které působili smykovým napětím. Tyto nosníky následně vyztužili CFRP profily a zjistili, že měly stejnou pevnost ve smyku, jako

výchozí nevyztužené nosníky. V jedné z nedávných studií Chennareddy a Taha prokázali, že pevnost ve smyku a ohybu ŽB nosníků lze výrazně zvýšit současným použitím technologie NSM a vyztužením nosníku pláty FRP do tvaru písmene U. Použití hybridního systému vedlo také ke změně ve výsledné destrukci zkoumaného nosníku. Výsledkem bádání Akrousheho et al., kteří použili ŽB nosníky zpevněné CFRP profily, bylo, že napětí, při kterém došlo k první deformaci, bylo o 21–47 % větší pro vyztužené nosníky v porovnání s nevyztuženými. [39]

5.6.3 Axiální uplatnění

„Jedním z prvních použití materiálů FRP bylo posílení mostních pilířů a sloupů, které byly vystaveny vlivům zemětřesení. Pro tyto účely se běžně využívaly FRP desky, ačkoli některé z nedávných studií navrhly také použití výztuží typu NSM. Okrajové ohraničení betonových sloupů, tzn. spirálové obtočení betonového povrchu FRP kompozitem, může zvýšit pevnost v tlaku a zabránit podélnému ohýbání ocelových výztuží.“ [39]



Obrázek 20 - Schéma použití FRP kompozitu pro zvýšení pevnosti ŽB pilířů v axiálním směru.

Studie prováděna Siddiquiem et al., se zabývala především ŽB sloupy, zpevněnými různými typy FRP materiálů ve formě profilů. Jednotlivé sloupy byly vyztuženy 1, 2, nebo 4 vrstvami kompozitu. Výsledky zkoušek naznačovaly, že CFRP desky poskytovaly betonu patřičný zpevňující účinek a zároveň dostatečnou podporu kontinuálním vláknům, čímž došlo ke zvýšení pevnosti a houževnatosti ŽB sloupů. Studie dále nastínila, že účinek kontinuálních FRP vláken může být výraznější při použití užších sloupů. Li et al. prováděli zkoušky na ŽB zdích, na kterých byly pravidelně nebo nepravidelně rozmístěné pukliny. Zdi vyztužili pláty CFRP a vystavili působení axiálního zatížení. Po provedení testů Li et al. odhalili, že CFRP výztuže zvýšily boční odolnost zpevněných zdí o 7–36 %. [39]

5.7 Společnosti vyrábějící kompozitní materiály

5.7.1 Theodor Vanck GmbH

Jedním z odvětví, kterým se zabývá německá firma Vanck, je výroba a instalace kompozitů na bázi GFRP, které se často používají k antikorozi ochraně ocelových prvků. Firma je známá díky své technologii „dýchacího prostoru“, kdy mezi kompozitní trubkou nebo deskami a ocelovým potrubím je volný prostor vyplněný vzduchem. Vzniklý systém s vrstvou volného prostoru poskytuje lepší korozní ochranu v porovnání s běžnými antikoroziními materiály přiléhajícími těsně k povrchu chráněného materiálu. Uspořádání trubka v trubce se využívá např. ke korozní ochraně potrubí v tepelných elektrárnách. V současné době je firma pravděpodobně známější pod jiným názvem, jelikož v posledních několika letech došlo k sloučení Theodor Vanck GmbH s jinou společností. Po spojení se firma nově jmenuje Christen & Laudon GmbH. [8]

5.7.2 Ameron International

Další renomovanou společností vyrábějící širokou škálu produktů pro různá odvětví průmyslu, mezi jinými také známý potrubní systém Bondstrand, je firma Ameron. Trubky Bondstrand jsou kompozity, ve kterých funkci matrice zastupuje epoxidová pryskyřice doplněná o vyztužující skleněná vlákna. Jednou z největších předností zmíněných kompozitních trubek, v porovnání s běžnými kovovými nebo ocelovými trubkami, je korozní odolnost vůči různým typům vodního prostředí, mezi které lze zařadit např. slanou vodu, vodu bohatou na minerály, podzemní vodu nebo demineralizovanou vodu. Trubky Bondstrand také zaručují vynikající průtok kapaliny po celou dobu používání, hlavně díky velmi hladkému vnitřnímu povrchu trubky, s kterým se váže nízká absolutní drsnost (do $5,3 \times 10^{-3}$ mm). [53]

5.7.3 Future Pipe Industries

Světověznámá společnost vyrábějící především kompozitní, termoplastické a betonové trubky pro chemický, potravinářský nebo petrochemický průmysl, ale také zásobní nádrže nebo plováky pro bagrovací průmysl. Hlavními přednostmi kompozitních trubek, skládajících se ze skleněných vláken zalitých syntetickou pryskyřicí, jsou nízká hustota, odolnost proti korozi, šetrnost k životnímu prostředí a výborný poměr ceny k výkonu. Trubky společnosti Future Pipe Industries jsou známy pod různými obchodními značkami, např. Wavistrong, Fiberstrong, Vinylstrong nebo Wavifloat. [54]

5.7.4 HOBAS CZ

Jedná se o úspěšnou mezinárodní firmu, která se specializuje na výrobu plastových trubek vyztužených skleněnými vlákny. Trubky HOBAS nacházejí uplatnění v různých průmyslových odvětvích, používají se např. jako potrubí pro dopravu pitné nebo odpadní vody, v průmyslu papíru a celulózy, v průmyslu minerálních olejů a díky velmi hladkému vnitřnímu povrchu trubek se používají také pro přívod hnací vody ve vodních elektrárnách. Za širokou škálu použití trubek HOBAS odpovídá především jejich dlouhá životnost, odolnost proti korozi, dobrá snášenlivost s okolím a dobré mechanické vlastnosti. Na závěr je vhodné uvést, že společnost HOBAS využívá ke zhotovení svých trubek metody odstředivého lití, která umožňuje vyrobít vysoce kompaktní a zároveň nepropustné potrubí. V roce 2016 se společnost Hobas spojila se zahraniční firmou Flowtite. V následujícím roce došlo k založení společnosti Amiblu, která vlastní technologii Hobas a Flowtite. [55]

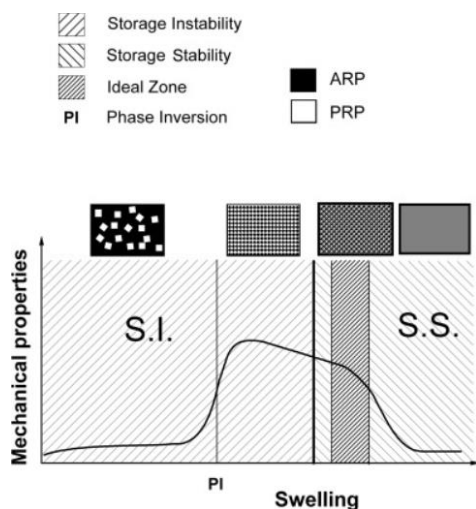
6 Asfalty modifikované polymery

První zmínky o asfaltu jako stavebním materiálu pocházejí už z počátku 18. století př. n. l., ale významnější postavení ve stavebním průmyslu nabyl asfalt až v 19. století n. l. Asfalt se skládá z velkého počtu různých alifatických, aromatických a dalších organických sloučenin, které spolu tvoří relativně homogenní směs. Ve starověku používali lidé při stavbách výhradně přírodní asfalt, který byl až po mnoha stovkách let v 19. století nahrazen „umělým“ asfaltem, vyráběným frakční destilací ropy při teplotách 300–350 °C. [34][38] Asfalt je typickým zástupcem skupiny viskoelastických materiálů, avšak jeho vlastnosti jsou silně závislé na teplotě. Při nízkých teplotách se bude asfalt chovat jako tuhý a křehký materiál, náchylný ke vzniku prasklinek i za působení mírného zatížení, ale už při středně vysokých teplotách se změní na viskoelastickou kapalinu. Při vysokých teplotách překračujících 100 °C bude asfalt viskózní kapalinou. V současné době se asfalt používá jako materiál pro výrobu střešních krytin a izolací, ale především jako pojivo v asfaltovém betonu (spojením kameniva a asfaltového pojiva vznikne asfaltobeton), který nachází uplatnění při stavbě silnic. S oblibou se asfaltobetonový materiál používá právě při stavbách moderních silnic a dálnic, jelikož zvyšuje bezpečnost jízdy během deštivého počasí tím, že snižuje možnost vozidla dostat smyk a zároveň omezuje hlučnost dopravních prostředků v porovnání s jinými typy vozovek. Bylo prokázáno, že vlastnosti asfaltového pojiva mají přímou souvislost s různými typy poškození vozovky, mezi které lze zařadit především vyjíždění kolejí, vznik trhlinek a prasklin působením stálého zatížení a poškození způsobené změnami teploty. K vyjíždění kolejí automobily bude docházet působením konstantního zatížení obzvláště v horkých letních měsících, kdy z důvodu vysoké teploty při povrchu vozovky dochází ke snížení viskozity asfaltového pojiva. Dalším typem poškození jsou praskliny vznikající únavou materiálu. Hlavním důvodem jejich vzniku je dynamické zatěžování vozovky neustálým projížděním vozidel. Významné poškození (vznik trhlinek) způsobují také extrémní výkyvy teplot. V důsledku stále většího zatěžování vozovek nákladními automobily dochází k rychlejšímu opotřebení asfaltobetonového materiálu, a proto se do asfaltových pojiv začaly přidávat polymerní látky, jejichž hlavním účelem je zvýšit adhezi pojiva ke kamenivu, zlepšit odolnost vůči působícímu zatížení a prodloužit životnost vozovky. Do běžné polymerní asfaltové směsi se přidává 3–7 hmot. % daného polymeru, zatímco vysoce modifikované asfaltové směsi obsahují 8 hmot. % nebo i více. Nejčastěji používanými typy polymerních látek v těchto směsích jsou termoplastické elastomery, polyolefiny a reaktivní polymery. [34][45][46] Asfaltová pojiva modifikovaná polymery lze do určité míry pokládat za neobvyklé kompozitní materiály, jelikož k samotnému modifikujícímu polymeru se většinou přidávají částicová plniva, která zlepšují jeho mechanické vlastnosti a vytváří tak částicový

kompozit. Ten je následně dispergován do asfaltové směsi, která zastupuje úlohu matrice, a plní funkci elastické výztuže, která zajišťuje zvýšenou odolnost vůči únavě. [35]

6.1 Princip míšení polymeru a asfaltu – kompatibilita směsi

Za stále častější používání AMP při stavbách silnic odpovídá především fakt, že určité druhy polymerů jsou schopny značně ovlivnit reologické vlastnosti asfaltových směsí i při velmi nízkých koncentracích. Samotný proces míšení je ale komplikovanější proces a žádoucí zlepšení vlastností asfaltu lze dosáhnout pouze při určité morfologii směsi, kdy dochází k inverzi fází. Nejvhodnějšími asfaltovými modifikátory se ukázaly termoplastické polymery, obzvláště pak ty fyzikálně zesíťované. Během míšení je potřebné, aby se fyzikální síť zachovala, nedošlo k jejímu úplnému rozpuštění a v ideálním případě došlo k rozšíření sítě v rozsahu celého asfaltového pojiva, které by tak vlastně získalo mechanické vlastnosti polymeru. O tom, zda vše proběhne podle ideálních předpokladů, rozhodují vzájemné interakce mezi molekulami asfaltu a polymeru. V průběhu míchání asfaltu a polymeru působí molekuly asfaltu jako rozpouštědlo a způsobují zbotnění makromolekul. S postupem času dojde ke vzniku dvoufázového systému. Jelikož ne všechny molekuly asfaltu ochotně reagují s polymerem (tzv. asfaltény), bude jedna fáze obohacena asfaltovými molekulami (AF) a v druhé fázi budou převažovat nabíjené molekuly polymerní látky (PF). V závislosti na provozních podmínkách (teplotě, době míchání a dalších) a schopnosti rozpouštědla zbotnat polymer se bude struktura jednotlivých směsí méně či více odlišovat. Výsledkem procesu míšení a rozpouštění mohou být dva základní stavy. „Pokud se na zbotnění polymeru podílí jen malé množství molekul asfaltu, PF bude rozptýlena v kontinuální AF, a celkové vlastnosti se nebudou výrazně lišit od vlastností nemodifikovaného asfaltu.“ Naproti tomu při dostatečném stupni zbotnění dojde k výše zmíněné inverzi fází a ve směsi bude převažovat polymerní fáze, která bude významně ovlivňovat výsledné vlastnosti asfaltového pojiva. Míšení směsi lze proto považovat za poněkud složitý proces, při kterém musí dojít k určitému minimálnímu zbotnění a rozpouštění polymerních molekul, tak aby došlo k inverzi fází, ale zároveň se musí zachovat struktura fyzikální sítě polymeru. Je nutné rovněž zmínit, že při dlouhodobém skladování asfaltového pojiva může docházet v důsledku rozdílného složení AF a PF k jejich vzájemnému rozdělení. Hnací silou tohoto procesu je především rozdíl hustot jednotlivých fází. [34]



Obrázek 21 - Grafické znázornění mechanických vlastností AMP v závislosti na stupni zbotnění makromolekul. [34]

Výše zobrazený obrázek lze interpretovat následujícím způsobem. Mícháním směsi po krátkou dobu bude celkový počet zbotnalých makromolekul malý. Vlastnosti pojiva se začínají výrazně měnit až po dosažení inverze fází, ale směs je nestabilní a nelze ji skladovat, jelikož může dojít k rozdělení fází. „Další zvýšení stupně zbotnění má za následek mírné snížení výkonnosti, která ale zůstává mnohem vyšší než u běžného asfaltu, dokud směs nevstoupí do oblasti úplného rozpuštění, kde se systém stane homogenní směsí a účinek polymeru je opět zanedbatelný.“ Ve zjednodušené formě charakterizují strukturu směsi obdélníky nad grafem v obrázku 38, kde je černou barvou vyznačena fáze bohatší na asfaltové složky a bílou barvou fáze bohatší na polymer. Cílem míchání je odhadnout tu správnou chvíli a přestat. Ve směsi musí proběhnout inverze fází, ale nesmí dojít k úplnému rozpuštění všech makromolekul, zároveň je žádoucí, aby se systém nacházel ve stavu vhodném pro skladování. Jak vyplývá z obrázku 38, tato zóna je vykreslena hustě proužkovaným šedým obdélníkem. [34]

6.2 Polymery používané jako modifikátory v asfaltových pojivech

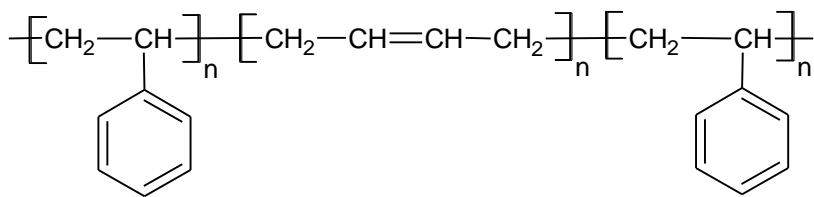
Nejčastěji používanými typy polymerů v asfaltových pojivech jsou termoplastické elastomery a plastomery. Polymerní látky zlepšují vlastnosti asfaltu, zvyšují viskozitu pojiva za vysokých teplot a také zvyšují elasticnost při nízkých teplotách.

6.2.1 Termoplastické elastomery

Mají strukturu mírně zesíťovanou fyzikální sítí. Zvyšují pevnost pojiva v tahu pouze v případě, kdy řetězce makromolekul jsou do značné míry napnuty. S oblibou se využívají jako modifikátory pojiv, jelikož po skončení působení napětí se řetězce vracejí do původní polohy, na rozdíl od plastomerních řetězců. Polymery spadajícími do této skupiny modifikátorů jsou např. styren-butadien-styrenový (SBS) kopolymer, butadienstyrenový kaučuk (SBR), styren-isopren-styrenový (SIS) kopolymer a další. [45]

Styren-butadien-styren (SBS)

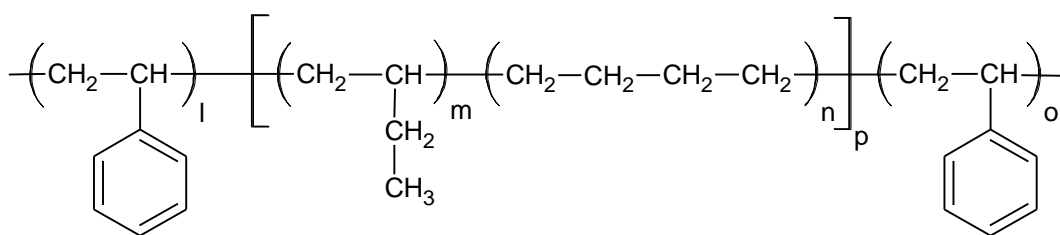
SBS je nejčastěji používaným polymerním modifikátorem asfaltových směsí v dnešní době. Studie prokázaly, že tento polymer zvyšuje odolnost asfaltového pojiva vůči vzdušné vlhkosti, vzniku trhlinek v materiálu při nízkých teplotách, vyjíždění kolejí a dynamickému zatěžování. Jelikož makromolekula SBS se skládá z tuhých polystyrenových (PS) domén, s teplotou skelného přechodu T_g přibližně 100 °C a elastických polybutadienových (PB) řetězců s T_g kolem -95 °C, lze kopolymer používat v celém rozsahu teplot skelných přechodů. Po smíchání SBS s asfaltovým pojivem vzniká v důsledku vzájemných interakcí trojrozměrná síť, kde polystyrenové stavební jednotky odpovídají za zvýšení pevnosti v tahu SBS při vysokých teplotách a působí jako uzly vzniklé fyzikální sítě, zatímco ohebnější PB řetězce zaručují elasticitu, houževnatost a ohebnost SBS při nízkých teplotách. Dvojnásobné vazby přítomné v PB řetězcích způsobují zvýšenou náchylnost kopolymeru k degradaci kyslíkem, UV zářením a teplem. Aby nedocházelo ke zhoršení jízdních vlastností vozovky, do asfaltové směsi se přidávají antioxidanty, např. ZDDP nebo ZDBC, které zpomalují oxidační reakci. Směs obsahuje rovněž různá částicová plniva, např. na bázi fosforu, síry, dále polystyren, kaolinitový prášek, glycidil methakrylát a další, jejichž hlavním úkolem je zabránit separaci fází. Další vylepšení mechanických a reologických vlastností asfaltu lze docílit vulkanizací, při které vzniknou mimo pevnější polymerní síť také disulfidické a polysulfidické můstky mezi polymerními molekulami a asfaltem, které ve velké míře zabraňují případné separaci složek. Mezi výhody SBS lze zařadit např.: vyšší tuhost, vysokou odolnost vůči vyjíždění kolejí, poměrně nízkou teplotu skelného přechodu a větší pružnost při nízkých teplotách. Nevýhody SBS lze shrnout do několika bodů: vysoká cena výrobku, malá odolnost vůči oxidaci, teplu a UV záření, vyšší hořlavost a občasné problémy s kompatibilitou s některými pojivy. [45]



Obrázek 22 – Strukturní vzorec SBS kaučuku [56]

Styren–(Ethylen-co-Butylen)–Styren (SEBS)

Náchylnost SBS k degradaci kyslíkem, teplem nebo vlhkostí vedlo výzkumníky k syntéze SEBS, který se vyrábí hydrogenací kopolymeru SBS a vykazuje značnou odolnost vůči výše zmíněným vlivům na úkor vyšší ceny výrobku. Za hlavní důvod vyšší odolnosti SEBS lze pokládat nasycenost všech vazeb v řetězci Ethylen-co-Butylen, která zaručuje vyšší tuhost a menší polaritu v porovnání s kopolymerem SBS. Kopolymer SEBS zajišťuje vyšší odolnost asfaltového pojiva proti vyjždění kolejí, ale zároveň má menší vliv na únavu materiálu v porovnání s SBS. Ve stavitelské praxi obsahují asfaltobetonové směsi přibližně 3-4 hmot. % polymeru SEBS, ke kterému se přidává také kaolinitový prášek upravující tokové a mechanické vlastnosti výsledného modifikovaného asfaltu. Mezi výhody SEBS lze zařadit především: vysokou odolnost vůči působení atmosférického kyslíku, tepla a UV záření. Nevýhody SEBS lze shrnout do několika bodů: v porovnání s SBS je dražší a má menší elasticitu, problémy se skladováním. [45]

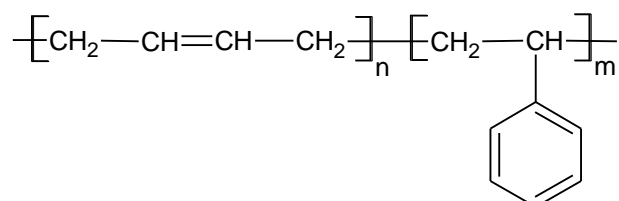


Obrázek 23 - Strukturní vzorec polymeru SEBS [57]

Butadienstyrenový kaučuk (SBR)

Neplněný SBR nevykazuje žádoucí zlepšení vlastností asfaltového pojiva při nízkých a vysokých teplotách. Podle studie Zhanga et. al., lze přidavkem přírodního asfaltu do směsi zlepšit houževnatost, tepelnou stabilitu, životnost a další vlastnosti pouze při vysokých teplotách, nikoliv při nízkých. „Bylo zjištěno, že struktura asfaltu modifikovaného SBR je značně závislá na zdroji asfaltového pojiva. Kvůli nedostatečné kompatibilitě SBR

s asfaltovým pojivem a jeho náklonností k separaci, je někdy zapotřebí třetí komponenta, aby došlo k vytvoření stabilnějšího systému.“ Těmito plnivy jsou např. montmorillonit, organický palygorskít, některé typy uhlí a různé další látky. Mezi výhody SBR lze započítat např.: odolnost vůči vzniku trhlinek a prasklin působením vysokých a nízkých teplot a větší odolnost materiálu vůči teplotním výkyvům. Nevýhody SBR lze shrnout do dvou bodů: malá kompatibilita polymeru s asfaltovými pojivy a kratší životnost SBR. [45]



Obrázek 24 – Strukturní vzorec SBR kaučuku [57]

6.2.2 Plastomery

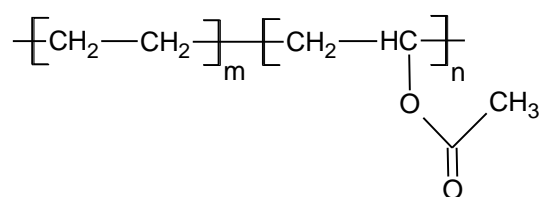
V porovnání s termoplastickými elastomery vykazují plastomery vyšší tuhost, ale jen malou, nebo žádnou schopnost elasticky se deformovat. Jelikož elastická deformace se u plastomerů prakticky nevyskytuje, působící zatížení způsobuje většinou popraskání materiálu, bez přítomnosti projevů pružnosti. K výhodám plastomerů lze započítat také jejich rychlou počáteční pevnost při působícím zatížení. Do této skupiny plastů lze zařadit např. ethylen-vinylacetát (EVA), ethylen-butylacetát (EBA), nízkohustotní a vysokohustotní polyethylen, ethylen-propylen-dienový kaučuk (EPDM), polystyren (PS) a další polymery. Pro zlepšení vlastností asfaltu se využívají také modifikátory na bázi polyethylenu (PE). V dnešní době, kdy je kladen velký důraz na ochranu životního prostředí, se do asfaltových pojiv přidává právě recyklovaný nebo odpadní polyethylen. Velmi malá rozpustnost PE v asfaltu, potřeba použití vysoké koncentrace polymeru a jeho náklonnost ke krystalizaci neřadí PE mezi často používané modifikátory, ale lze takto využívat odpadní a recyklovaný polyethylen. [45]

Zcela obecně lze poznamenat, že polymery na bázi polyethylenu po přidání do směsi zvyšují křehkost asfaltového pojiva, ale posouvají skelnou oblast výsledného systému k nižším teplotám. Bylo prokázáno, že přidávkem nízkohustotního polyethylenu (LDPE) k asfaltové směsi dochází ke zvýšení lomové houževnatosti systému v celém rozsahu teplot, přičemž nejvyšších hodnot nabývá houževnatost při nízkých teplotách. Dalším modifikátorem je

vysokohustotní polyethylen (HDPE), který více ovlivňuje mechanické vlastnosti pojiva (než např. LDPE, EPDM nebo SBS), ale velmi snadno dochází u HDPE k separaci fází. [45]

Ethylen-vinylacetát

Začal se používat už v 90. letech minulého století jako modifikátor asfaltových směsí, který zlepšuje zpracovatelnost a zároveň zvyšuje jejich odolnost vůči působícímu zatížení. „Kopolymer EVA je termoplastickým materiálem, který svou ohebností a pružností připomíná elastomery. S rostoucím množstvím VA/BA skupin klesá krystalinita, ale polarita a kompatibilita EVA/EBA s asfaltem se bude zvyšovat.“ Ve srovnání s asfaltovými pojivy modifikovanými SBS vykazuje asfalt smíšený s kopolymerem EVA při koncentraci přibližně 9 hmot. % menší závislost na teplotě, ale zároveň je méně odolný vůči vzdušné vlhkosti a má menší elasticitu a pružnost. Obecně lze říci, že kopolymer EVA nemá tak velký vliv na reologické vlastnosti asfaltu jako kopolymer SBS, ale v porovnání s jinými druhy polyethylenů má značný vliv na tokové vlastnosti. Snadná dispergovatelnost a s ní spojená poměrně dobrá kompatibilita polymeru EVA s asfaltovým pojivem naznačuje, že při nízké koncentraci vinylacetátových skupin v řetězci polymeru bude modifikované asfaltové pojivo stabilní při skladování a nebude docházet k nežádoucí separaci. Mezi výhody EVA lze zařadit např.: větší odolnost vůči teplotním výkyvům a vzniku trhlin únavou materiálu, odolnost proti vyjíždění kolejí a dobrou stabilitu během skladování. Nevýhodami jsou např.: menší elasticita EVA a zanedbatelné zlepšení mechanických vlastností asfaltového pojiva polymerem při nízkých teplotách. [45]



Obrázek 25 - Strukturní vzorec PEVA [57]

7 Závěr

Cílem práce bylo vypracování literární rešerše pojednávající o rozdělení kompozitů a využití polymerních kompozitních materiálů ve stavebním průmyslu. Celá práce je teoretickým přehledem, který se skládá ze tří hlavních částí.

První část práce je zaměřena na popis jednotlivých druhů vyztužujících komponent, tzn. vláken a částicových disperzí, které se nejčastěji používají v kompozitních materiálech. Druhá část přibližuje princip adheze, která je velmi důležitým parametrem charakterizujícím pevnost spojení mezi dílčími fázemi v kompozitech. Ve třetí části je popsáno využití polymerních kompozitů ve vybraných stavebních oborech s bližší charakteristikou vláknových polymerních kompozitů a asfaltů modifikovaných polymery.

Současné století se nese v duchu pokroku a rozvoje moderních technologií, ve kterých jsou kompozity leckdy nezastupitelnými materiály a v blízké budoucnosti sehrají nepochybně ještě důležitou roli.

8 Seznam použité literatury

1. 6_Kompozitni-materialy.pdf. Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní [online]. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
2. DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály – druhy a jejich užití. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1
3. GRUBER, Josef. Mechanika II, Pružnost a pevnost. [online]. SPŠ strojní Plzeň. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/mec_uceb/mec2_txt.pdf
4. Příspěvatelé Wikipedie. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Hookův zákon. [online]. ©2020, Datum poslední revize 8. 09. 2020, 13:42 UTC, [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hook%C5%AFv_z%C3%A1kon&oldid=18981306
5. HORÁČEK, Přemysl. Kompozitní materiály: Vláknové kompozity s polymerní matricí. [online]. [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3099074/>
6. ŠVECOVÁ, Petra. Tvrdost vs. houževnatost průmyslových nožů: Houževnatost materiálů. [online]. MM. 2013. [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tvrdost-vs-houzevnatost-prumyslovych-nozu.html>
7. ŽALEK, Tomáš. Vývoj technologie lisování kompozitu pro automobilový průmysl. [online]. Zlín, 2015. [cit. 2021-04-26]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Dostupné z: <https://docplayer.cz/43503140-Vyvoj-technologie-lisovani-kompozitu-pro-automobilovy-prumysl-bc-tomas-zalek.html>
8. Chisten & Laudon GmbH. Firemní katalog. [https://www.christen-laudon.de/EN/Company/\(1\)History/](https://www.christen-laudon.de/EN/Company/(1)History/)
9. GRÉGR, Jan. Czechdesign. Skleněná vlákna – historie a současnost. [online]. 2003. [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.czechdesign.cz/temata-a-rubriky/sklenena-vlakna-historie-a-soucasnost>
10. Příspěvatelé Wikipedie. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Uhlíkové vlákno. [online]. ©2020, Datum poslední revize 10. 10. 2020, 13:25 UTC. [cit. 2021-02-09]. Dostupné z:

https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno&oldid=19061471

11. Vlákna pro kompozity. [online]. Volny, 2019 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20100401025714/http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
12. VESELÝ, K. ZILVAR, V. LEDNICKÝ, F. MATĚJKA, L. KUČERA, J. FORTELNÝ, I. LACHMANN, Z. ORLT, J. RAAB, M. Polymerní kompozity. Praha: Ústav makromolekulární chemie ČSAV, 1990. Edice Macro, sv. N-17. str. 8-49. ISBN 80-85009-05-6
13. KOŘÍNEK, Zdeněk. Vlákna. [online]. 2018. [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79503/F2-BP-2018-Zitek-Adam-priloha-vlakna.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
14. Materials & Processes: Resin matrices for composites. [online]. Composites World, 2016. [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-matrix>
15. MLEZIVA, Josef. POLYMERY – výroba, struktura, vlastnosti a použití. Praha: Sabotáles, 1993. ISBN 80-901570-4-1.
16. BÖHM, Pavel. Změření povrchového napětí během chvilky. [online]. 2010. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=144>
17. Příspěvatelé Wikipedie. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Povrchové napětí. [online]. ©2021, Datum poslední revize 14. 02. 2021, 08:00 UTC. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Povrchov%C3%A9_nap%C4%9Bt%C3%AD&oldid=19477820
18. BORMASHENKO, Edward. Progress in understanding wetting transitions on rough surfaces. Advances in Colloid and Interface Science. [Online]. 2014. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868614000530>
19. AWAJA, Firas. GILBERT, Michael. KELLY, Georgina. FOX, Bronwyn. PIGRAM, J, Paul. Adhesion of polymers. Progress in Polymer Science. [Online]. 2009. [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670009000501>
20. SABU, Thomas. HANNA J, Maria. JITHIN, Joy. CHIN, Han Chan. LALY A, Pothen. Natural Rubber Materials, Volume 2: Composites and Nanocomposites – 9.2.1.2

- Ceramic Matrix Composites (CMCs). Royal Society of Chemistry, 2014. str. 251-253. ISBN 978-1-84973-631-2. Dostupné z:
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00TXDKY1/natural-rubber-materials/ceramic-matrix-composites>
21. ABBOOD, Imad Shakir. ODAA, Sief aldeen. HASAN, F. Kamalaldin. JASIM, A. Mohammed. Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – A review. Materialstoday: Proceedings. [online]. 2020. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320357618>
 22. SONNENSCHNEIN, Robert. GAJDOSOVA, Katarina. HOLLY, Ivan. FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges. Procedia Engineering. [online]. 2016. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816328946>
 23. ARCS. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. Pultruze (tažení). [online]. 2017. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>
 24. PREFA KOMPOZITY. Technologie výroby. [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>
 25. iLL street composites. Carbon fiber glass: Processes Available. [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.carbonfiberglass.com/Composites-Manufacturing/Composites-Manufacturing-Processes.html>
 26. ÅSTRÖM, B. T. Manufacturing of Composites. Stockholm: CRC Press, 2017. str. 194-232. ISBN-13: 978-0-7487-7076-2 (pbk).
 27. BEDNÁŘOVA, Ilona. Vliv materiálové báze nátěrových systémů na trvanlivost dřeva. [online]. Brno, 2017. [cit. 2021-02-26]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=142341
 28. Architektura, stavebnictví. Druhy nátěrových vrstev, druhy nátěrových hmot, příprava podkladu. [online]. 2010. [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://stavebnictvi-architektura.studentske.cz/2010/03/druhy-naterovych-vrstev-naterovych-hmot.html>
 29. PEŘINA, Zdeněk. ČMIEL, Filip. Podlahy. [online]. [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/ps2/podlahy.html>
 30. VERNER, Tomáš. Polymerní materiály používané ve stavebnictví s důrazem na podlahové krytiny. [online]. Pardubice, 2017. [cit. 2021-02-27]. Bakalářská práce.

Univerzita Pardubice. Dostupné z:

https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/71519/VernerT_PolymerniMaterialy_MV_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

31. Redakce nazeleno. Tepelné izolace: Polystyren, minerální vata a další. [online]. 2010. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/stavba/izolace-2/tepelne-izolace-polystyren-mineralni-vata-a-dalsi.aspx>
32. DUJKOVÁ, Zuzana. Polystyren/jíl nanokompozity. [online]. Zlín, 2014. [cit. 2021-02-28]. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/30770/dujkov%C3%A1_2008_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y
33. AL-SAAD, Umran Ali. ARAVINTHAN, Thiru. LOKUGE, Weena. Structural applications of fibre reinforced polymer (FRP) composite tubes: A review of columns members. Composite Structures. [online]. 2018. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822318303544>
34. POLACCO, Giovanni. FILIPPI, Sara. MERUSI, Filippo. STASTNA, George. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. Advances in Colloid and Interface Science. [online]. 2015. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868615001165#s0135>
35. BŁAŻEJOWSKI, Krzysztof. OLSZACKI, Jacek. PECIAKOWSKI, Hubert. Wysoce modyfikované asfalty Orbiton HiMA. [online]. 2014. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: https://www.orlden-asfalt.pl/PL/InformacjeTechniczne/PortalWiedzy/Documents/ORLEN_Broszura_HIMA_CZ-0215.pdf
36. PAJS. Wikipedie. Tvar závislosti mezi napětím a prodloužením pro ocelovou tyč. [online]. 2007. [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pru%C5%BEnost>
37. HRUŠKOVÁ, Miriam. Studium smáčení a vzlínání do vlákných struktur. [online]. Liberec, 2016. [cit. 2021-03-02]. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/24664/BP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
38. Příspěvatelé Wikipedie. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Asphalt. [online]. ©2020. Datum poslední revize 30. 11. 2020, 13:17 UTC. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Asfalt&oldid=19217997>

39. NASER, M. Z. HAWILEH, R. A. ABDALLA, J. A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Engineering Structures*. [online]. 2019. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029618310113#s0045>
40. MINSTER, Jiří. Aplikace vláknových polymerních kompozitů ve stavebnictví. [online]. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/stav.pdf>
41. HSISSOU, Rachid. SEGHIRI, Rajaa. BENZEKRI, Zakaria. HILALI, Miloudi. RAFIK, Mohamed. ELHARFI, Ahmed. Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*. [online]. 2021. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382232100101X#s0030>
42. OSTREZI, Jan. Optimalizace parametrů pultruze kompozitů na bázi epoxidových matric. [online]. Brno, 2015. [cit. 2021-03-10]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=99218
43. Madehow. Fiberglass. [online]. 2018. [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <http://www.madehow.com/Volume-2/Fiberglass.html>
44. Teijin. What is aramid?. [online]. 2020. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.teijinaramid.com/en/technology/what-is-aramid/>
45. BEHNOOD, Ali. GHAREHVERAN, Modiri Mahsa. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*. [online]. 2018. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305718318019#s0060>
46. TANG, Naipeng. HUANG, Weidong. HAO, Gengren. Effect of aging on morphology, rheology, and chemical properties of highly polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*. [online]. 2021. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182100355X>
47. SIČÁKOVÁ, Tereza. Vliv hotmeltových PUR lepidel na kvalitu laminovaných textilií v automobilovém průmyslu. [online]. Liberec, 2013. [cit. 2021-04-25]. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/12651/mgr_24403.pdf?sequence=1
48. BEDNAŘÍK, Martin. Lepení polymerů. [online]. Zlín, 2011. [cit. 2021-04-25]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Dostupné z:

https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16394/bedna%C5%99%C3%ADk_2011_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

49. HOF, Manfred. BRAVENÝ, Tomáš. Lepidla a techniky lepení součástek. [online]. 2013. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:2612/lepidla-a-techniky-lepeni-soucastek>
50. HANZELKOVÁ, Martina. Experimentální výzkum použitelnosti a trvanlivost tmelů užívaných ve stavebnictví. [online]. Brno, 2018. [cit. 2021-04-25]. Teze disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=186870
51. COUFAL, Daniel. Vývoj tmelů pro spárování keramických obkladů. [online]. Brno, 2018. [cit. 2021-04-26]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=178650
52. Paulín. Paulín CZ, s.r.o. Přírodní oleje a vosky na dřevo. [online]. [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.paulin.cz/24872-tmely-na-drevo>
53. Ameron International Corporation. Firemní katalog. <https://www.company-histories.com/Ameron-International-Corporation-Company-History.html#>
54. Future Pipe Industries. Firemní katalog. <https://futurepipe.com/>
55. Hobas CZ. Firemní katalog. <https://www.amiblu.com/cs/about-us/>
56. Polymer Science Learning Center. [online]. [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <https://www.pslc.ws/macrog/sbs.htm>
57. Polymer Properties Database. [online]. [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/class%20index.html>