

STUDIE – KONSTRUKČNÍ MATERIÁL POLYMERBETON

Tomáš Valenta

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš VALENTA**
Osobní číslo: **T08572**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Studie – Konstrukční materiál polymerbeton**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Přehled konstrukčních nekovových materiálů používaných pro výrobu modelů a forem
3. Přehled výrobních technologií používaných pro výrobu modelů a forem
4. Polymerbetony – jejich fyzikální, chemické a zpracovatelské vlastnosti
5. Přehled technologií využitelných pro výrobu modelů a forem z polymerbetonů
6. Závěr

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

KOCMAN, Karel. Speciální technologie : obrábění. 3., přeprac. a dopl. vyd. Brno : CERM, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8

PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I.. Brno : CERM, 2001. 505 s. ISBN 8072041932

PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II.. 2., opr. a rozš. vyd. Brno : CERM, 2002. 392 s. ISBN 8072042483

Další literatura dle průzkumu

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Zdeněk Dvořák, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2011

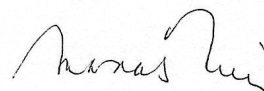
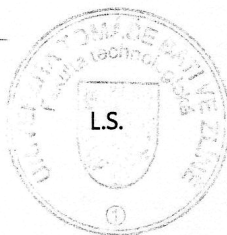
Termín odevzdání bakalářské práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

ABSTRAKT

Abstrakt česky

Práce se zabývá využitím polymerbetonu jako konstrukčního materiálu. Především jeho fyzikálními, chemickými a technologickými vlastnostmi. Byl proveden přehled možných technologií pro výrobu modelů a forem pro polymerbeton.

Cílem práce bylo zmapovat složení, vlastnosti a další použití polymerbetonu pro konstrukční účely.

Klíčová slova: polymerbeton , konstrukční nekovové materiály, kompozit, vlastnosti polymerbetonů

ABSTRACT

Abstrakt anglicky

This thesis deals with the use of polymer concrete as a construction material. First of all it's physical, chemical and technological properties. It is a review of possible technologies for the production of models and molds for polymer concrete.

The aim was to map the composition, properties and other uses of polymer concrete for construction purposes.

Keywords: polymer concrete, constructional non-metallic materials, composite, properties of polymer concretes

Rád bych poděkoval všem lidem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě mé bakalářské práce. Zvláště bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Zdeňku Dvořákovvi, CSc za odborné vedení, cenné rady a náměty, které mi poskytoval při vypracování bakalářské práce.

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

Ve Zlíně,

.....

Podpis

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 KOMPOZITY	12
1.1.1 Rozdělení kompozitů	12
1.2 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	19
1.3 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	20
2 POLYMERBETONY	22
2.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA POLYMERBETONŮ	22
2.2 PLNIVO	23
2.3 POJIVO.....	25
2.3.1 Epoxidové pryskyřice.....	26
2.4 PŘÍSAKY KLASICKÝCH POLYMERBETONŮ	28
3 FYZIKÁLNÍ, CHEMICKÉ A ZPRACOVATELSKÉ VLASTNOSTI	29
3.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI.....	29
3.1.1 Modul pružnosti	29
3.1.2 Teplotní stabilita.....	32
3.1.3 Tlumící schopnosti polymerbetonu	34
3.1.4 Vnitřní pnutí odlitků z polymerbetonu.....	35
3.2 CHEMICKÉ VLASTNOSTI.....	36
3.2.1 Absorbce vody, mrazuvzdornost, korozivzdornost.....	36
4 TECHNOLOGIE VÝROBY ODLITKŮ Z POLYMERBETONU	40
4.1 TECHNOLOGIE VÝROBY POLYMERBETONOVÝCH DÍLŮ	40
4.1.1 Dávkování	40
4.1.2 Míchání	41
4.1.3 Odlévání	42
4.1.4 Sřásání a zhutňování směsi	43
4.1.5 Vytvrzování směsi.....	44
4.1.6 Dodatečné úpravy odlitků	45
4.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ, DRUHY A MATERIÁLY FOREM PRO ZPRACOVÁNÍ POLYMERBETONŮ	46
4.3 KONSTRUKČNÍ ZÁSADY NÁVRHU POLYMERBETONOVÉHO DÍLU	48
4.4 EKOLOGIE A ZPRACOVÁNÍ ZBYTKŮ.....	49
4.5 VÝZTUŽNÉ MATERIÁLY A PLNIVA POLYMERBETONŮ	49
4.5.1 Plniva.....	50
4.5.2 Výztužné materiály.....	50
ZÁVĚR	53
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	58
SEZNAM OBRÁZKŮ	59
SEZNAM TABULEK.....	61
SEZNAM PŘÍLOH.....	62

ÚVOD

Během vývoje lidské společnosti si člověk osvojil schopnost využívat nejrůznější druhy materiálů jako kámen, bronz, železo, dřevo nebo keramiku. Zvládnutí výroby a použití nově objevených materiálů vždy posunulo míru uspokojení potřeb člověka na vyšší úroveň.
[1]

Polymerbeton zařadíme mezi moderní kompozitní materiál. Je složen z anorganické výztuže a vytvrditelné organické matrice. Jako výztuž se používají přírodní nebo umělé materiály (např. žula, čedič, křemenec, oceli, lehčené polymery). Matrice obvykle bývá dvoukomponentní tvořena pryskyřicí a vytvrzovacím prostředkem.

Mezi značné výhody polymerbetonu patří vynikající schopnost tlumení, teplotní stabilita, široká konstrukční variabilita a také nižší náklady oproti běžně používaným materiálům na výrobu odlitků.

Cílem této práce je podat co nejucelenější přehled o používaných materiálech a technologiích na výrobu odlitků z polymerbetonu. Dále pak studiem zjistit a shromáždit důležité vlastnosti polymerbetonu pro jeho využití v konstrukční praxi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Prakticky každý materiál bychom mohli nazývat kompozitem. Jelikož polymerbeton, o němž se studie především zajímá, je zařazen mezi kompozity, budou v této části zmíněny základní pojmy, rozdělení kompozitů a také některé jejich specifické vlastnosti kompozitních materiálů.

1.1 Kompozity

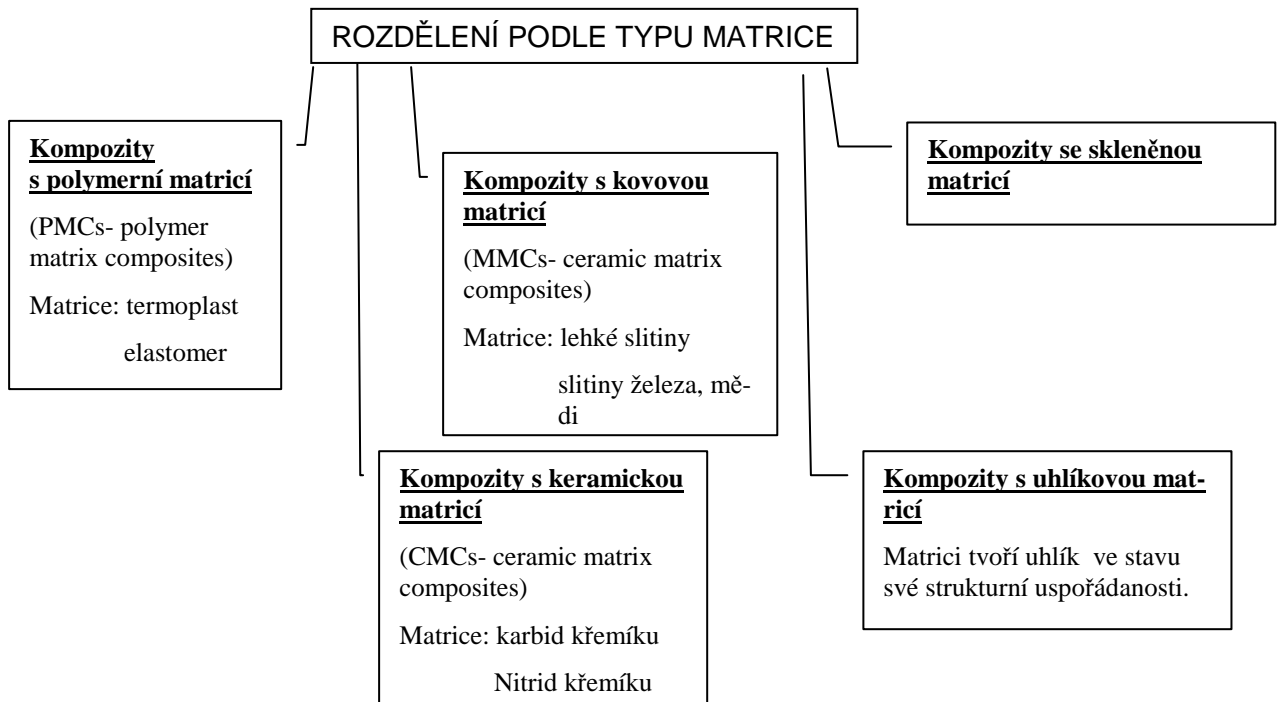
Kompozitem rozumíme materiál, který se skládá ze dvou nebo více složek (fází). Fáze je oddělená fyzikálně stejnorodá část soustavy, obvykle se výrazně liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Vyskytuje se v geometricky ohraničené oblasti. Složka, která je v materiálu plynule rozptýlena je nazývána matrice. Matrice má v kompozitu několik funkcí. Zajišťuje spojení sekundární fáze v jeden celek (výrobek) a zastává tedy úlohu pojiva. Zprostředkovává přenos sil na nespojitou fázi a odděluje od sebe navzájem jednotlivé částice nebo vlákna a tím zabraňuje kontinuálnímu šíření trhlin. Rovněž chrání nespojitou fázi před působením vnějšího prostředí. Nespojitá fáze bývá obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze. Tuto fázi nazýváme výztuž (též plnivo). [1], [2]

K tomu, aby materiál byl považován za kompozit, musí být podíl výztuže větší než 5%. Výztuž obvykle bývá tužší a pevnější v tahu než matrice. Kovy obsahují jednotlivé složky, které mají téměř identické vlastnosti, proto nepovažujeme kovovou slitinu za kompozit. Podobně je tomu například u některých typů polymerů, u kterých jsou přidávána plniva. Jsou sice složenými materiály, ale jejich fyzikální vlastnosti nejsou těmito příměsemi podstatně ovlivněny. [5]

1.1.1 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály lze dělit podle několika hledisek. Nejběžnější způsoby rozdělení:

Rozdělení podle typu matrice:



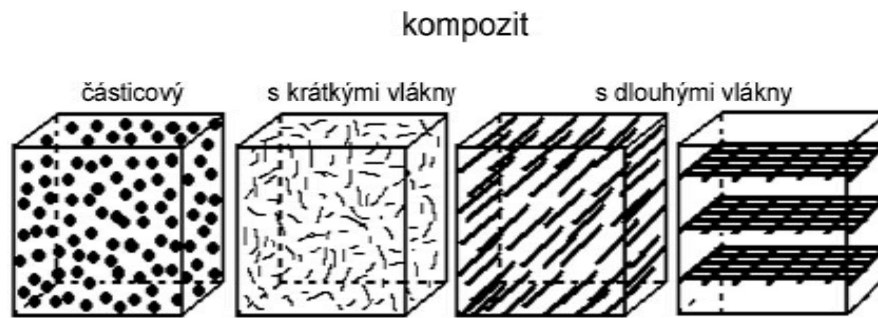
Obr. 1. Schéma rozdělení kompozitních materiálů dle typu matrice

Rozdělení podle geometrického tvaru výztuže:

Částicové kompozity: jeden rozměr útvarů výztuže nepřesahuje výrazně rozměry ostatní. Vyztužující částice pak mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný.

Vláknové kompozity: výztuž je v jednom směru výrazně rozměrnější

- Krátkovláknové kompozity: vlákna o délce řádově stonásobku jejich tloušťky, v matrici jsou dispergována buď náhodně nebo s přednostní orientací.
- Dlouhovláknové kompozity: dlouhá vlákna o délce desítek až stovek mm, orientována náhodně s přednostní orientací v ploše nebo prostoru, nebo kontinuální vlákna zabudovaná v matrici s jednosměrnou, dvousměrnou nebo trojsměrnou orientací (např. tkaniny).



Obr. 2. Rozdělení kompozitů podle geometrického tvaru výztuže

Časticové kompozity

Vzhledem k tomu, že polymerbeton patří do skupiny časticových kompozitních materiálů, bude v následujícím textu věnována poněkud větší pozornost časticovým kompozitním materiálům.

Časticové kompozity jsou ty, jejichž výztuží jsou nevláknité částice a jejichž rozměry se ve všech směrech příliš neliší. Částice mají tvar kulový, krychlový, čtyřstěnný, destičkový či jiný jim podobný.[6]

- **Kompozity I. typu:** Hlavní charakteristikou tohoto druhu je, dispergovaná fáze (plnivo) je segregovaná v matrici a nevytváří vlastní, svébytnou strukturu. U tohoto typu kompozitu hraje rozhodující roli interakce mezi částicemi plniva a matrice na molekulární úrovni. Obecně jsou částice mnohem menší než u dalších typů. Velikost se pohybuje v rozmezí cca 10-100 μ m. Jedná se tak o disperzně zpevněné kompozity a mechanismus zpevnění závisí především na vzájemném působení částic na pohybu dislokací uvnitř matrice. Dispergované částice mohou být kovové i nekovové. Tyto kompozity mohou mít kovovou, polymerní a minerální matrici.
- **Kompozity II. typu a III. typu:** U těchto kompozitních materiálů je matrice většinou reaktoplastická a plnivo anorganické. Jejich plnivo je obecně tvrdší a pevnější než matrice. Materiály tohoto typu jsou tzv. polymermalty a polymerbetony.

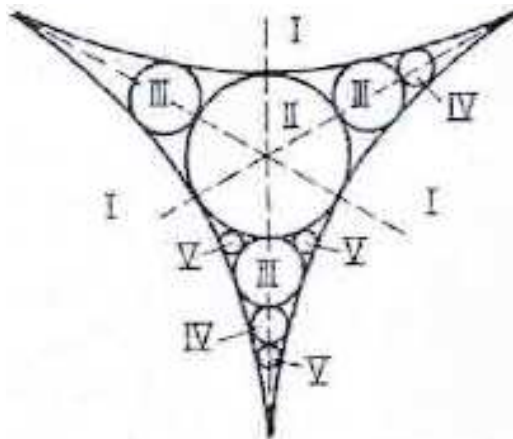
Jedním z nejdůležitějších předpokladů dobrého výsledku je dokonalé promísení všech složek (monomeru, tvrdidla nebo iniciátoru, popř. urychlovače, plniva a ostatních přísad) a dále dokonalé zpracování ztuhnutím. Promísení a

zpracování mimo jiné zajišťuje homogenitu směsi a minimalizaci zdrojů poruch a jejich šíření, zejména při mechanických namáháních.

Parametrem ovlivňujícím tyto systémy je geometrická formulace a uspořádání pojiva, jež ovlivňuje objemovou hustotu dispergované fáze, a tedy i její mezerovitost. Na obr. 3. je znázorněna polydisperzní soustava.

Pro zpracování je důležitá životnost směsí, tj. časový interval mezi okamžikem smísení složek a počátkem změny viskozity (tuhnutí).

Během výroby je snaha o co nejdokonalejší vytvrzení, maximální konverzi (přeměnu monomeru na polymer). Tato snaha se zakládá na tom, že každá nedokonalost vytvrzení znamená podstatné snížení odolnosti kompozitu vnějším vlivům. Tvrdnutí je proces dlouhodobý a krátkodobé dotvrzení při zvýšené teplotě je vždy velmi prospěšné.[8]



Obr. 3. Polydisperzní soustava

Minimální teoretická pórovitost (mezerovitost) znamená, že v případě ideálně kulových částic jsou mezery mezi největšími primárními koulemi zaplněny menšími sekundárními koulemi, zbylé mezery jsou vyplněny koulemi terciálními atd. Ani v případě použití sebe-menší výplně bychom nedocílili nulové pórovitosti, protože ani koule s malými rozměry nejsou schopny zaplnit mezery beze zbytku.[6]

Tab. 1. Orientační hodnoty pórovitosti systémů

systém	pórovitost [%]
monodisperzní	26,0
binární	14,5
ternární	6,5
polydisperzní	3,9

Vláknové kompozity

Ačkoliv jsou dnes známy rozsáhlé aplikace vláknových kompozitů, bude tato oblast probrána jen krajově, jelikož nejsou hlavním předmětem této studie. Tato část slouží pouze k doplnění přehledu rozdělení kompozitních materiálů.

Kompozity vyztužené vlákny se nazývají vláknové kompozity. Důležitým parametrem je poměr štíhlosti. Jedná se o vztah mezi maximální délkou L a minimálním průměrem plniva D .

- $\frac{L}{D} = 1$ jde o symetrické částice (kulovité, kubické, elipsoid)
- $1 < \frac{L}{D} < 1000$ plnivem jsou krátká vlákna a vločky
- $\frac{L}{D} > 1000$ plnivem jsou dlouhá vlákna [7]

U vláknových kompozitů jsou využívány vysoké mechanické vlastnosti vláken ve směru jejich osy tj. vysoká pevnost a modul pružnosti. Vlákna mají mnohem vyšší mechanické vlastnosti v porovnání se stejným, ale masivním materiálem. Příčinou je pokles velikosti strukturních defektů ve vláknech, orientace těchto defektů ve směru vláken a rovněž snížení celkové pravděpodobnosti výskytu defektů. [9]

Tab. 2. Porovnání pevnosti v tahu

materiál	Pevnost v tahu [MPa]	
	masivní materiál	vlákno
sklo	~100	~ 1800
uhlík(grafit)	~20	~2000-6000
SiC	~500	~3000

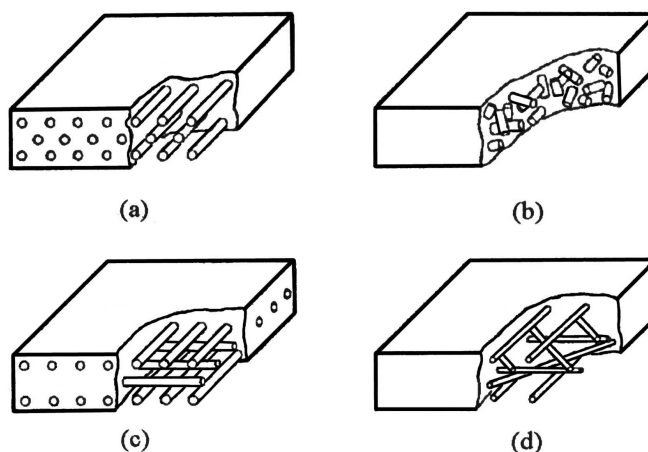
Mezi nejčastěji používané vláknové výztuže kompozitů patří vlákna kovová (ocelová, chromá, molybdenová a jiná). Dále se využívá nekovových vláken (křemičitá a křemenná skla, vlákna z bóru a další). Využívají se také polymerní vlákna (např. polyesterová, polyamidová, aramidová a další).

Zvláštní skupinu vláken, které vyhovují nejnáročnějším požadavkům tvoří whiskery. Whiskery jsou tvořeny monokrystalickými vlákny s velkým poměrem délky ku průměru. Mezi whiskery patří např. grafit, SiN, SiC. Vynikající pevnostní vlastnosti jsou dány vysokou dokonalostí krystalů, pak je možno dosáhnout téměř teoretické pevnosti materiálu. Nutno však dodat, že tyto vlákna jsou velmi drahá. [10]

Tab. 3. Vlastnosti některých vláken

druh vlákna	měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	pevnost v tahu [MPa]	modul pružnosti v tahu [MPa]
Cr	99,4	1000 až 4000	353 000 až 424 000
Mo	10,2	2 410	358 000
ocel	7,74	2800 až 4140	210 000
Be	1,83	1 270	200 000 až 315 000
Al	2,66	600	73 000
Ti slitiny	4,51	550 až 2200	118 000
sklo-S	2,5	4 800	85 000
sklo-křemenné	2,2	7 000	74 000
uhlík (PAN)	1,9	3 700	350 000
SiC	3,3	3 300	420 000
PE	1,38	600	1 200
PA	1,14	800	2 900

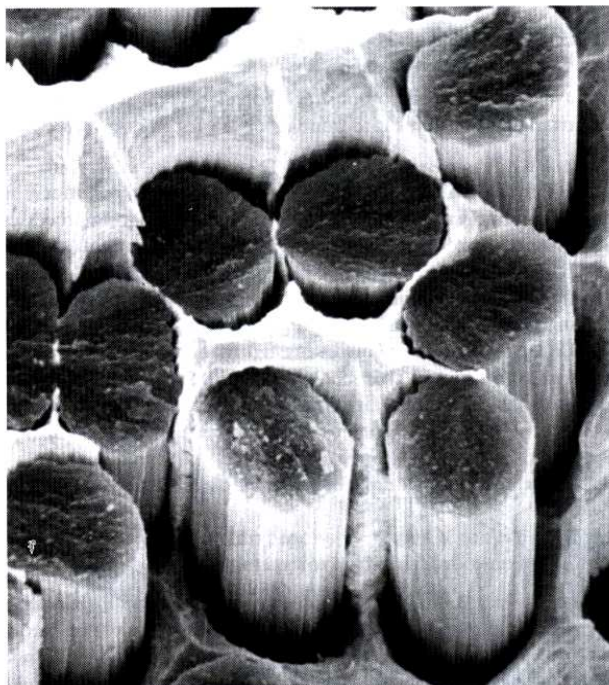
Vláknové kompozity se často vyznačují značnou anizotropií vlastností (pokud nemají úpravu dle obr. 4.). Vlastnosti vláknových kompozitů lze ovlivňovat výrobou různě orientovaných vláken v matrici.



Obr. 4. Různé druhy orientace vláken v matrici

Na obr. 4. jsou znázorněny různé typy orientace vláken výztuže. Spojitá jednosměrně orientovaná vlákna (a), nespojitá náhodně orientovaná vlákna (b), spojitá ortogonálně orientovaná vlákna (c), náhodně orientovaná dlouhá vlákna - netkaná rohož (d). [1]

Pro názornější ilustraci umístění vláken v matrici slouží obr. 5. Jedná se o fotografii slitiny AgCu zpevněnou uhlíkovými vlákny.



Obr. 5. Slitina AgCu, zpevněná uhlíkovými vlákny.

1.2 Vlastnosti kompozitních materiálů

Rozhodující vliv na výsledné vlastnosti kompozitních materiálů má několik faktorů:

- **Vlastnosti jednotlivých fází** - tj. mechanické vlastnosti a jejich poměr (pevnost, modul pružnosti, Poissonův součinitel)
- **Objemové zastoupení fází, jejich geometrický tvar a geometrické uspořádání** – tj. množství, orientace a průměrná vzdálenost dispergované fáze. Zde při popisu vlastností platí, že i pokud máme shodnou geometrii vyztužení, nejsou ještě zaručeny shodné vlastnosti.
- **Interakce jednotlivých fází a vlastnosti styku** – tj. schopnost přenosu zatížení z matrice do vyztužujících částic a samozřejmě naopak. Tato schopnost se dá jinými slovy nazvat soudržnost materiálu.
- **Interakce s okolním prostředím.** Tento parametr závisí do značné míry na třech předešlých parametrech. [8]

Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů jsou funkcí řady parametrů, z nichž nej-důležitější jsou následující:

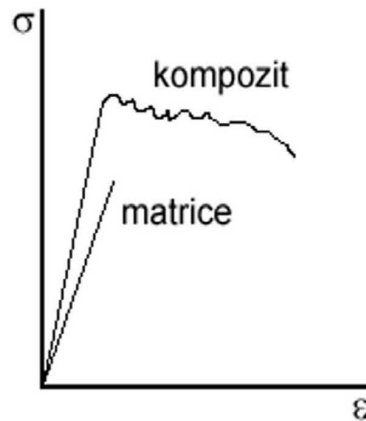
- mechanické vlastnosti matrice a výztuže
- délka vláken výztuže
- soudržnost matrice a výztuže
- objemový podíl a uspořádání výztuže

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek.

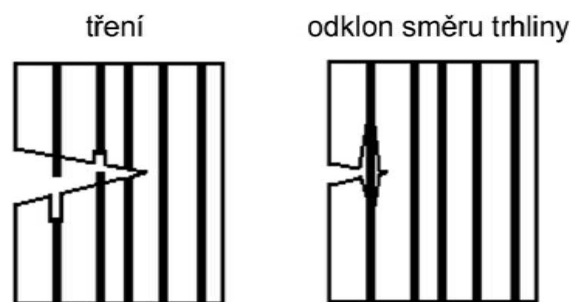
Typickým příkladem synergického chování je kompozit složený z keramické matrice vyztužené keramickými vlákny. I když jsou jak matrice tak vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tzn. odolností proti náhlému křehkému porušení.

Pro ilustraci jsou porovnány na obr. 6. tahové diagramy křehké matrice a kompozitu se stejnou matricí, jež byla vyztužena navíc křehkými keramickými vlákny. Uvedené chování kompozitu je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlinka (obr. 7.) je brzděna na rozhraní matrice a vláken. Dochází zde k odklánění směru šíření trhliny a také k intenzivnímu tření

mezi matricí a vytahujícími se vlákny. Kvalita rozhraní mezi matricí a výztužným materiálem má zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu.[9], [4]



Obr. 6. Porovnání tahových diagramů



Obr. 7. Jevy na rozhraní matrice a vláken

1.3 Technologie výroby kompozitních materiálů

Zde je uveden pouze stručně přehled technologií pro výrobu kompozitů. V návaznosti na využití polymerbetonu jako konstrukčního materiálu bude v samostatné kapitole popsána podrobněji výroba forem a modelů pro zpracování polymerbetonu.

Výroba kompozitního materiálu s matricí v tuhém stavu, zahrnuje následující technologie:

- lisování za tepla
- válcování za tepla
- explozivní tváření
- plazmový nástřik

- elektrolytické nanášení

Výrobu kompozitního materiálu s matricí v tekutém stavu lze členit na tyto postupy:

- infiltrace vláken tekutým kovem
- nanášení tekutého kovu na zpevňující vlákna
- kontinuální lití
- zalévání zpevňujících vláken

Jiné způsoby výroby kompozitního materiálu:

- protlačování za tepla
- technologie práškové metalurgie [10]

2 POLYMERBETONY

2.1 Základní charakteristika polymerbetonů

Polymerbeton je moderní kompozitní materiál skládající se z vytvrditelné organické matrice a anorganického plniva (obr. 8.).

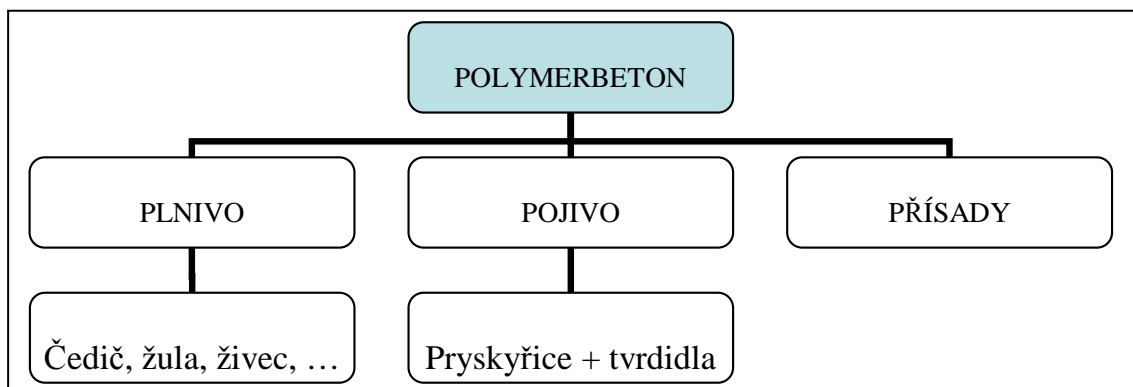
Polymerbeton je řazen do skupiny částicových kompozitních materiálů (podrobněji popsány již výše). Do této skupiny patří také cementový beton s vláknovou, textilní a jinou výztuží, dále částicové kompozity s kulovým typem plniva. Z polymerbetonu mohou být vyráběny odlitky v řádu několika kilogramů až několika tun, což dává široké možnosti pro jeho další využití. Největší část odlitků vyráběných z polymerbetonu je v současné době určena pro lože a podstavce výrobních a obráběcích strojů, které našly využití ve všech průmyslových odvětvích.[11]

Další využití polymerbetonu spadá do oblasti stavebnictví. Používá se například pro lité podlahy nebo ve fasádových systémech či jako odvodňovací žlaby apod.

V cizojazyčné literatuře se polymerbeton označuje:

- Anglicky: Polymer Concrete (PC), mineral casting
- Německy: Mineralguss, Reaktionshartzbeton , Polymerbeton

Norma zabývající se polymerbetonem (uváděn též jako minerální litina) ve strojírenství: DIN 51 290 ((Prüfung von Reaktionsharzbeton im Maschinenbau), datum vydání 1.5. 1991.



Obr. 8. Složení polymerbetonu

Na obr.9. je znázorněn příklad rozdílného vzhledu výsledných polymerbetonových odlitek od různých výrobců. [13] [14]

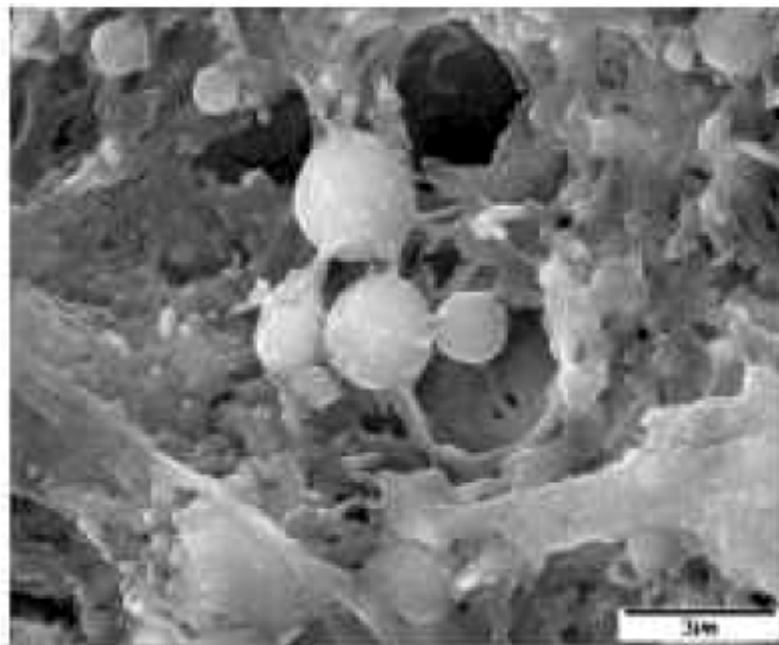


firma Epucter [14]



firma Schneeberger [13]

Obr. 9. Příklad vzhledu struktury



Obr. 10. Mikrostruktura polymerbetonu (SEM)

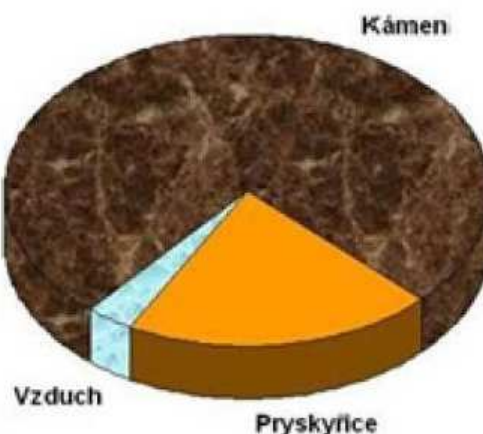
2.2 Plnivo

Plnivo polymerbetonů tvoří přibližně 80% celkového objemu směsi. Jako plniva se obvykle používají přírodní materiály (nerosty SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , ...) nebo jiné materiály (skleněné a kovové kuličky, kovový prášek). Anorganická plniva (přírodně nebo synteticky připravená) mohou mít různou strukturu

Tab. 4. Typy plniva

struktura plniva	materiál
prášková	sklo, křemen, dolomit, živec, čedič, vápenec, ...
vláknitá	mletá azbestová vlákna, skleněná, uhlíková a aramidová vlákna
destičková	kaolín, slída, břidlice, mastek, tuha,....

Při návrhu polymerbetonové směsi je určujícím především tvar, velikost, rozdělení a hmotnostní podíl obsahu plniva (obr. 11.). [12].



Obr. 11. Hmotnostní podíly

Kvalita polymerbetonu a hlavně jeho pevnost je dána malou pórovitostí (viz. kapitola částicové kompozity). To znamená, že vzniklé dutiny mezi hrubými zrny jsou vyplněny jemnějšími částicemi a pojivem. Čím menší je podíl pryskyřice ve směsi tím jsou pevnostní parametry lepší. Navzdory použití velmi jemné frakce, nebude nikdy docíleno nulové pórovitosti, jelikož ta klesá s vyššími řády. Zjednodušeně se dá říci, že i sebemenší částice nemohou vyplnit mezery beze zbytku.

Polymerbetony přizpůsobené pro strojírenské aplikace mívají většinou tři až čtyři frakce plniva (obr.12.). Rozměry jednotlivých frakcí plniva se pohybují ve značném rozmezí. Menší než 0,1mm u kamenné moučky, od 0,1 do 2 mm u písku až po 16 mm. Pro výraznější snížení pórovitosti se mohou doplňkově přidat skleněné mikrokuličky z E-skla (sklo označované jako electric, pro použití v elektroizolačním materiálu) v různých třídách zrnitost 0-50, 0-100, 50-100, 75-150, 120-200 μm . Kuličky mohou být též z šedé litiny nebo oceli. [7].



Obr. 12. Plniva

Podobně jako u cementových betonů, i zde se k určení optimální směsi využívá Fullerovy a Thompsonovy křivky zrnitosti. Polymerbeton musí pro dosažení co nejlepších mechanických vlastností vykazovat kompaktní strukturu s co možná největšími zrny. [8]

Pro výrobu lehčených a izolačních betonů se hojně využívají plniva na bázi přírodních materiálů.

2.3 Pojivo

V současnosti je na trhu dostupné relativně široké spektrum částicových kompozitů, které se liší matricí, typem a charakterem plniva a mnohdy i způsobem výroby. Z hlediska klasifikace matric existují dva základní typy matric:

- termoplasty
- termosety

Lze jednoznačně říci, že termoplasty naprosto tomuto poli dominují. [1]

Matrice polymerbetonu bývá dvoukomponentní skládá se z pryskyřice a tvrdidla.

Typy pryskyřic:

- polyesterové pryskyřice
- epoxidové pryskyřice
- polyuretanové pryskyřice
- fenolformaldehydové pryskyřice
- polyakrylové pryskyřice
- methylmetakrylátové aj.

V současnosti se jako pojivo v polymerbetonech v široké míře využívají epoxidové pryskyřice. [7]

2.3.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou kapalné až pevné látky, které mohou obsahovat přidané pomocné látky (např. rozpouštědla). V molekule obsahují nejméně jednu, obvykle však dvě epoxidové skupiny, jež jsou nutné jako funkční skupiny pro stavbu makromolekuly. Tvrdivadlo se přidává v kapalné nebo pevné formě a obsahuje v molekule aktivní vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými skupinami pryskyřice.

Epoxidové pryskyřice patří mezi termosety s dobrými mechanickými vlastnostmi. Vyznačují se vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k zvolenému typu plniva.

Mezi nejdůležitější druhy epoxidových pryskyřic patří bisfenol A a novolakové pryskyřice. Epoxidové pryskyřice jsou kromě běžných údajů charakterizovány tzv. epoxidovým ekvivalentem. Epoxidový ekvivalent udává kolik epoxidových skupin obsahuje váhová jednotka. Vlastnosti vytvrzených pryskyřic jsou ve velkém rozsahu ovlivněny širokým spektrem tvrdidel, které se většinou přizpůsobují dané aplikaci. Vhodnou volbou pryskyřic, druhu tvrdidla a přísad lze dosáhnout mnoha rozdílných vlastností pojiva. [18]

Pojiva polymerbetonů jsou obvykle dodávána ve formě více či méně viskózních tekutin.(obr. 13.). Svou konzistencí připomínají řídký med a jsou tvořeny relativně malými molekulami. Tato pojiva je posléze nutno vytvrdit po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzení probíhá většinou za pokojové teploty, nebo za zvýšených teplot. Výsledné vlastnosti ovlivňuje do značné míry způsob vytvrzení. V ideálním případě vzniká po vytvrzení makroskopický výrobek, který je ve své podstatě tvořen makromolekulou.



Obr. 13. Epoxidová pryskyřice pro polymerbetonové podlahy

Pojivo na bázi epoxidové pryskyřice ztrácí obvykle při teplotě 75°C své mechanické vlastnosti, což znamená, že odlitky z minerálního kompozitu není možné použít do provozu s teplotou vyšší než 75°C.

Mezi další typy pryskyřic, jež se využívají jako pojiva patří polyesterové, akrylové, furanové, metakrylové a polyuretanové. Tyto pryskyřice mají však značně vyšší objemové smrštění (až 18%). [7]

Pro ilustraci jsou zde uvedeny technické parametry epoxidového nízkoviskózního pojiva s obchodním označením COM 2. Využívá se pro hutné pohledové polymerbetonové podlahy.

Tab. 5. Technické parametry COM 2

Technické parametry	
Viskozita:	1200 mPa.s (při 23°C)
Pevnost v tlaku:	min. 60 MPa
Pevnost v tahu:	min. 38 MPa
Minimální teplota realizace:	8°C
Barevnost:	čirá, slabě nažloutlá kapalina, případně pigmentovaná.

2.4 Přísady klasických polymerbetonů

Mezi přísady patří:

- barviva
- látky snižující viskozitu
- látky zlepšující průběh zatékání směsi ve formě
- přilnavost ve směsi a odvzdušnění

Smysluplnou kombinací všech těchto složek lze nastavit přesně parametry pro konkrétní odlitek. Také zde patří separační činidla. Přidávají se pro usnadnění vyjímání hotového výrobku z formy. [8]

3 FYZIKÁLNÍ, CHEMICKÉ A ZPRACOVATELSKÉ VLASTNOSTI

3.1 Fyzikální vlastnosti

V oblasti kompozitních materiálů se setkáváme s pojmy, které charakterizují strukturu kompozitů a jejich symetrii, která má význam pro mechanickou odezvu částicových kompozitů (mezi než patří také polymerbeton). V této části budou uvedeny různé vlastnosti v závislosti na jejich významu při aplikaci tohoto materiálu.

Jako homogenní označujeme jednofázovou, jednokomponentní látku, jejíž fyzikální vlastnosti jsou ve všech bodech tělesa stejné. Pokud je materiál složen ze dvou nebo více komponent (popř. fází téže komponenty) pak mluvíme o heterogenním materiálu. [1]

Další pro nás významnou charakteristikou částicových kompozitů je míra symetrie jejich fyzikálních vlastností. Důležitým stavem materiálu je izotropie. To znamená, že všechny roviny procházející jedním bodem tělesa vyrobeného z tohoto materiálu jsou rovinami symetrie materiálových vlastností. Pokud materiálové vlastnosti nevykazují žádné roviny symetrie, poté hovoříme o anizotropním materiálu.[1]

U kompozitních materiálů typu polymerbetonu se setkáváme s pojmem kvaziizotropie. Stručněji řečeno se jedná o různé pohledy na daný kompozit. Z makroskopického hlediska (celý dílec) lze považovat dílec za izotropní. Avšak z mikroskopického měřítko považujeme takový materiál za anizotropní. Dá se říci, že s klesající symetrií vlastností narůstá počet materiálových konstant (E , G , ν) pro popis vztahu mezi napětím a deformací daného kompozitního tělesa. [1], [26]

3.1.1 Modul pružnosti

Moduly pružnosti jsou veličiny charakterizující rychlost růstu napětí v materiálu při růstu vnější deformace v oblasti malých deformací (u polymerbetonových materiálů pod 1%). Elastické moduly jsou citlivé na zastoupení jednotlivých komponent na jejich vzájemné prostorové uspořádání a na přítomnost různých defektů ve formě bublin. Při vyšším obsahu plniva (nad 20 hmotnostních %) je hodnota modulu pružnosti závislá i na kvalitě disperze plniva v matici. Moduly pružnosti u polymerbetonových dílů jsou relativně málo citlivé na lokální zvláštnosti struktury a na vazby mezi komponentami. [1]

Polymerbeton lze z makroskopického hlediska považovat za izotropní homogenní materiál s lineární závislostí prodloužení na napětí v oblasti platnosti Hookova zákona (6.1). [7]

Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.1)$$

Kde:

σ [MPa] napětí v tahu

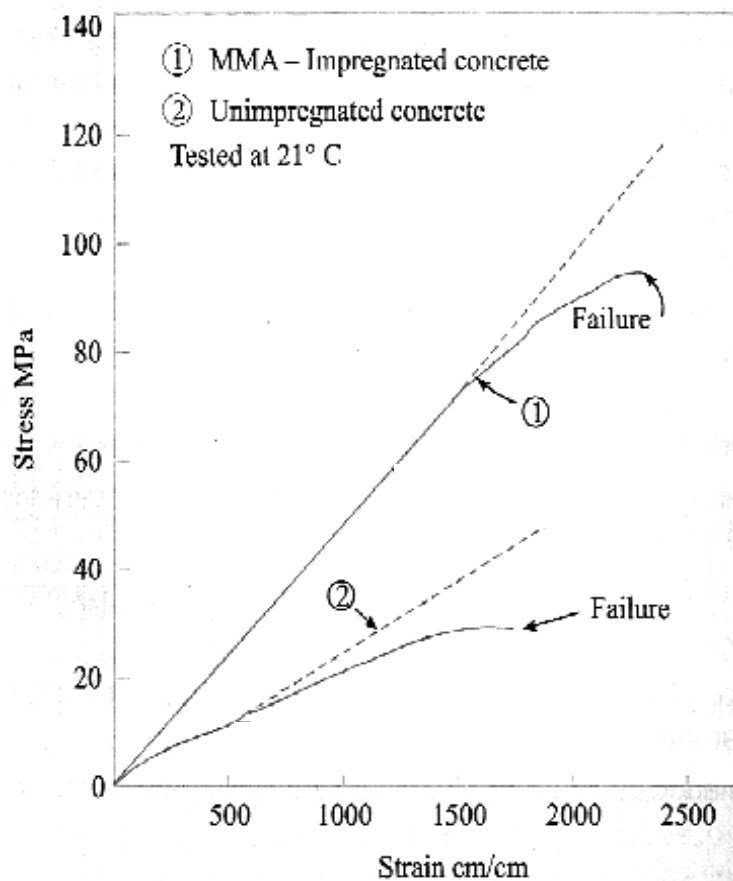
E [MPa] modul pružnosti v tahu (Youngův modul pružnosti)

ε [-] poměrné(relativní) prodloužení

Úspěšným způsobem přípravy vysoce hodnotného polymerbetonu je hloubková impregnace porézního systému různými druhy pryskyřice. Ta může být shodná nebo odlišná od původní matrice. Impregnace je schopna zajistit zmonolitnění všech stávajících poruch matrice. Dochází k vytvoření nové geometricky spojitě infrastruktury v systému. Povrch této nové infrastruktury je v přímém kontaktu se stávající strukturou původní matrice.

Takto vzniklý dvoustrukturní systém (zkratka PIC) poskytuje polymerbetonu podstatně lepší vlastnosti, než kdyby byl vytvořen přímo se součtovým množstvím pojiva. [21]

Například polymerbeton impregnovaný methylmetakrylátovou (MMA) pryskyřicí je křehký materiál, který vykazuje téměř lineární vztah napětí a deformace a vyznačuje se vysokou mezí pevnosti. Při porovnání tahových křivek polymerbetonu impregnovaného MMA (1) a běžného cementového betonu (2) vykazuje polymerbeton výrazně vyšší mez pevnosti (obr. 14.). [20], [25]



Obr. 14. Porovnání tahových křivek

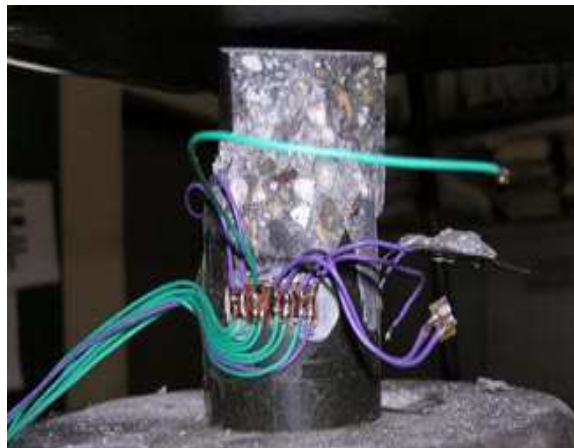
Tahová křivka polymerbetonu byla zjišťována při teplotě 21°C.

Maximální hodnotu modulu pružnosti $E = 5 \cdot 10^4$ MPa dosahují polymerbetony s největší frakcí se zrnitostí max. 16 mm. Měrná hmotnost polymerbetonu a modul pružnosti jsou zhruba třetinové než u litiny.[7]

Oproti oceli a šedé litině vykazuje minerální kompozit nízkou tuhost a pevnost, což je nahrazováno při konstrukci odpovídajícím zvětšením tloušťky stěny. Toto vede i přes nízkou hustotu polymerbetonu k vyšší konečné hmotnosti oproti odlitkům například ze šedé litiny. V tab. 6. je patrné detailní srovnání parametrů (mechanických vlastností) polymerbetonu s tradičními materiály.

Tab. 6. Porovnání vlastností polymerbetonu s tradičními materiály.

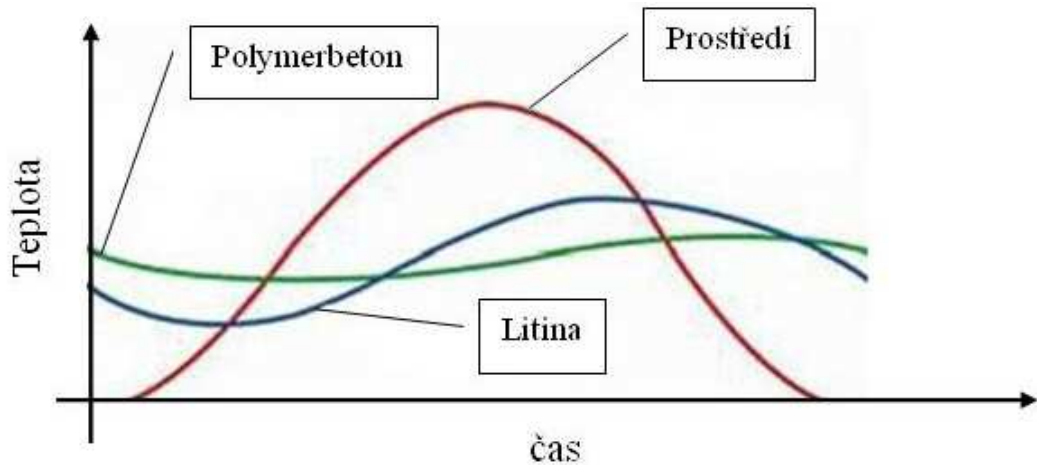
Parametr	OCEL	ŠEDÁ LITINA	POLYMERBETON	BETON
Hustota [kg.m ⁻³]	7850	7200	2300-2600	2200-2500
E-modul [10 ⁵ MPa]	2,1	0,8-1,4	0,3 – 0,5	0,5-3,9
Poissonova konstanta [-]	0,3	0,2-0,3	0,25-0,3	0,2-0,3
Pevnost v tahu [MPa]	350-1600	150-400	10-15	1,5-3,5
Pevnost v tlaku [MPa]	250-1200	700-1200	110-125	35-80
Pevnost v ohybu [MPa]	150-600	100-300	25-35	3-8
tlumení - log dekrement [-]	0,002	0,003	0,02-0,03	0,01
tepelná vodivost [W.m.K ⁻¹]	47-50	50	1-3	1,6-2,4
součinitel teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]	11-18	9-11	11,5-16	12
měrná tepelná kapacita [kJ. kg ⁻¹ . K ⁻¹]	0,49	0,45	0,7-1,3	0,8-1



Obr. 15. Výsledek tlakové zkoušky polymerbetonu

3.1.2 Teplotní stabilita

Polymerbetonové odlitky pomaleji reagují na změny teploty okolí (prostředí) ve srovnání s litinou viz obr. 16. Tento fakt je dán tím, že polymerbeton má velkou měrnou tepelnou kapacitu (viz tab. 6). V kombinaci s nízkou tepelnou vodivostí (asi 30x až 40x menší než u oceli a litiny). To se projevuje v mnohem menší reakci polymerbetonu při působení teplotních vlivů např. ve výrobní hale.



Obr. 16. Odezva materiálu na změnu teploty

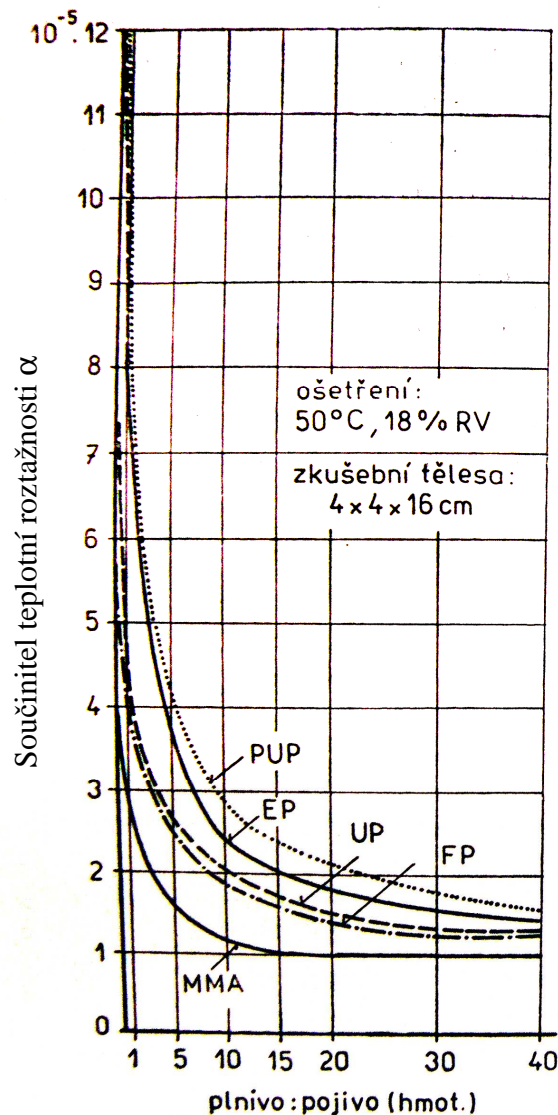
Nevýhodou nízké tepelné vodivosti je přehřívání míst se silnými zdroji tepla a tím vznik nerovnoměrných tepelných deformací. Tento nedostatek lze řešit místním zlepšením vodivosti polymerbetonu např. symetrickou tepelnou konstrukcí odlitku nebo oddálením nepříznivých zdrojů tepla. [7]

Rozdělení tepelných vlivů:

- Vnější (proudění vzduchu, tepelné vyzařování strojů apod.)
- Vnitřní (např. motory ve stroji, teplo od vřetena nebo čerpadla..)

Teplotní odolnost polymerbetonu je úzce spjata s typem použitého plniva a způsobu vytvrzení. Pohybuje se v rozmezí 70- 80 °C.

Pro konstrukční použití polymerbetonů, spolupracujících-li s jinými materiály (např. cementovým betonem), je jedním z rozhodujících činitelů velikost objemových změn vlivem změny teploty. Součinitel teplotní roztažnosti se bez ohledu na druh pojiva výrazně mění s objemovým zastoupením pojiva (obr. 17.). Závislosti byly získány při teplotě 50°C , relativní vlhkosti 18% a velikosti zkušebního tělesa 4 x 4 x 16cm. [21]

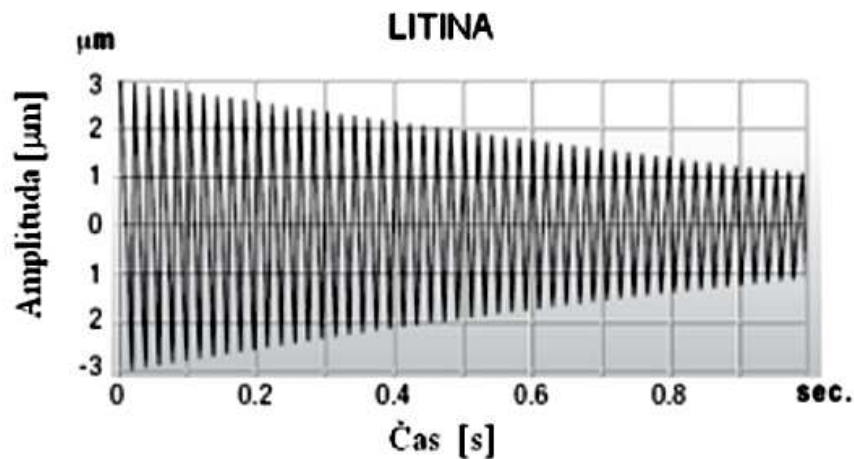


Obr. 17. Změna součinitele teplotní roztažnosti polymerbetonů

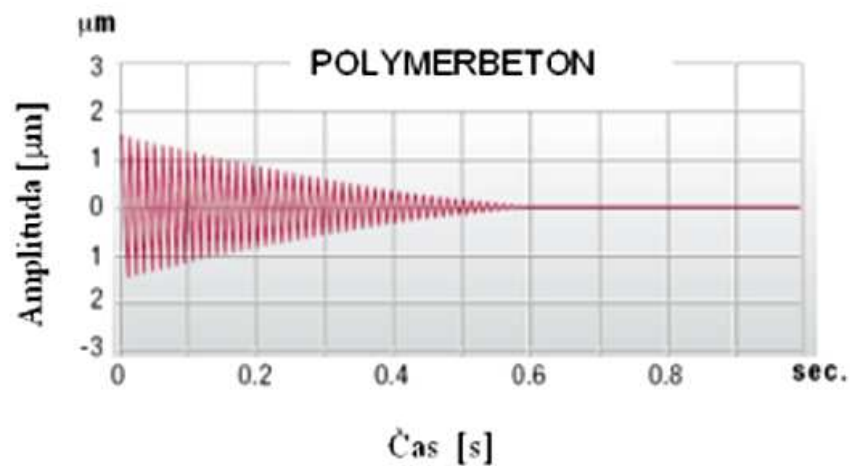
3.1.3 Tlumící schopnosti polymerbetonu

Dle výrobců polymerbetonu a použitých zdrojů je udávána hodnota tlumení 8 až 10x větší než u litiny (obr. 18.). To dává širokou možnost využití tohoto materiálu ve stavbě obráběcích strojů. Dochází ke zvýšení přesnosti stroje. Ve srovnání s litinou je docíleno u polymerbetonu (obr. 19.) snížení počtu vlastních kmitů, zároveň dochází k posunu vlastních frekvencí mimo kritickou oblast. Snižuje se amplituda kmitů při rezonanci a hluchnost.

Pokud je polymerbeton použit např. na stavbu stojanu obráběcího stroje je dosaženo vyšší jakosti obrobených ploch a také vyšší životnosti obráběcích nástrojů (až o 30%) [6],[13]



Obr. 18. Tlumící vlastnosti litiny



Obr. 19. Tlumící vlastnosti polymerbetonu

3.1.4 Vnitřní pnutí odlitků z polymerbetonu

Při technologickém procesu odlévání vzniká během ochlazování z lící na provozní teplotu vlastní pnutí vlivem napětí při smrštění odlitku. Tyto pnutí jsou u polymerbetonu minimální (jak již bylo zmíněno epoxidové pryskyřice jako pojivo mají nízkou smrštitost a teploty vytvrzování nejsou vysoké).

Kvalitní polymerbeton má výslednou smrštitost v rozmezí 0,02 až 0,03 %. V praxi byly naměřeny maximální hodnoty pnutí $3 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Vnitřní pnutí vlivem obrábění jsou téměř vyloučena[13].

3.2 Chemické vlastnosti

Chemické vlastnosti polymerbetonových odlišků a výrobků z polymerbetonu se značně liší v závislosti na použitém druhu pojiva a také výztuží. Hlavními chemickými vlastnostmi polymerbetonu důležitými pro aplikaci ve strojírenství a stavebnictví jsou absorpční schopnosti, mrazuvzdornost a dále pak odolnost proti působení chemických látek.

3.2.1 Absorbce vody, mrazuvzdornost, koroziivzdornost

Absorbce vody se u polymerbetonu značně snižuje vyplněním pórů polymerem. I propustnost vodě se snižuje tímto přidáním na 70- 80%. S ohledem na sníženou citlivost polymerbetonu na vodu, lze očekávat zvýšenou mechanickou pevnost. Dále můžeme očekávat odolnost proti cyklickému zmrazování a rozmrazování v důsledku přítomnosti polymeru v pojivu. Zatímco vzorek polymerbetonu (pojivo z PMMA) vykazoval pouze 0,5% ztrátu hmotnosti po 2400 cyklech, vzorek cementového betonu vykazoval ztrátu 25% hmotnosti po 600-ti cyklech.(viz tab. 7.). [16]

Chátrání betonu působením zmrazovacími a rozmrazovacími cykly je způsobeno vznikem hydraulického tlaku v kapilárách při zmrazování. Působení rozmrazovacích solí na beton má fyzikální a chemickou podstatu. Dochází ke krystalizaci solí v pórech a následné tvorbě trhlin. Chemické působení se realizuje nepříznivým působením na cement v betonu nebo oxidačním působením na výztuž. Vliv působení sulfátů a kyselin vede ke změnám v pórové struktuře a propustnost povrchové vrstvy se zvětšuje vlivem tvorby trhlin. Dá se tedy zjednodušeně říci, že z převážné většiny závisí mechanismu degradace betonu na aktuálním stavu pórů jeho povrchové struktury. [17]

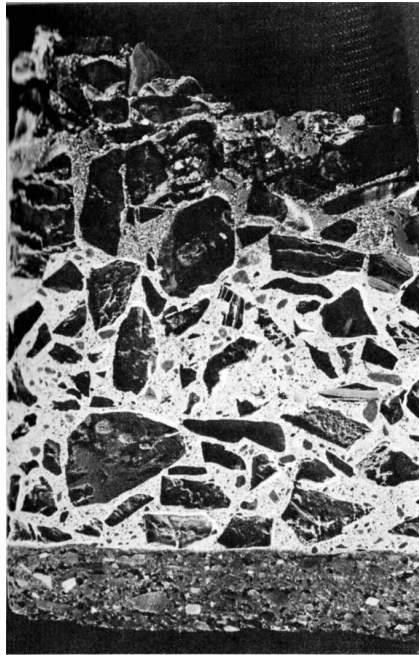
Tab. 7. Shrnutí vlastností

Vlastnost	Jednotka	Betonový kontrolní vzorek ¹	Polymerbetonový kontrolní vzorek ²
pevnost v tlaku	MPa	36	139
pevnost v tahu	MPa	2,9	11,2
modul pružnosti	GPa	24,1	43,43
modul pružnosti v ohybu	MPa	5, 1	18,2
absorbce vody	%	5,3	0,29
mrazuvzdornost			
počet cyklů		590	2420
ztráta hmotnosti	%	26,5	0,5
koroze 15% HCl (působení 84 dní)	% ztracené hmotnosti	10,4	3,6
koroze sulfáty (působení 300 dní)	%	0,144	0
koroze destilovanou H ₂ O	-	těžké poškození	bez poškození

¹ Složení betonové směsi : poměr voda/cement = 0,51 ; poměr cement/písek/průměrný poměr = 1:2:5:3,4 ; maximální velikost kameniva 2 mm, vytvrzený 28 dní.

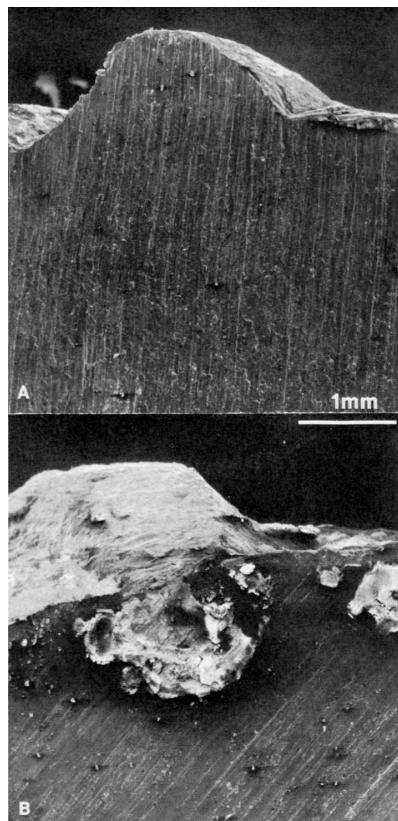
² polymerbeton s 6,7 hmotnostními % PMMA. [16]

Jak vyplývá z tab. 7. polymerbeton je ve srovnání s cementovým betonem odolný vůči destilované vodě, odolnější také vůči HCl a sulfátům. U cementového betonu destilovaná voda uvolňuje pryč části cementu, HCl napadá základní složky betonu a sulfátové ionty podstupují výměnu uhličitanů v krystalové struktuře. To způsobuje rozrušování struktury a konečnou poruchu materiálu. Typický příklad zvýšené odolnosti proti leptání kyselinami je na obr. 20. Ve spodní části obrázku byla struktura naleptána HCl přes tenkou vrstvu písku. Bylo více zasaženo plnivo (kamenivo) než vlastní matrice. V horní části byl beton bez přísad vážně zasažen kyselinou. Pojivo ztratilo svou funkci. [16], [17]



Obr. 20. Odolnost proti kyselinám

Konec ocelové výztuže do betonu po testování opakovaným zmrazováním betonové desky v přítomnosti solí.(obr. 21., A – polymerbeton; B- cementový beton)



Obr. 21. Porovnání odolnosti solím

. Degradace betonu bývá zapříčiněna také těmito vlivy: [17]

- korozi výztuže
- vnikáním chloridových iontů
- napadením sulfáty
- napadením solemi
- napadením alkáliemi
- působením kyselin
- alkalickou reakcí kameniva
- mechanickým obrušem
- požárem

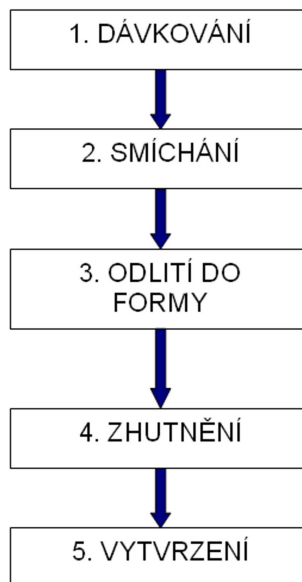
4 TECHNOLOGIE VÝROBY ODLITKŮ Z POLYMERBETONU

4.1 Technologie výroby polymerbetonových dílů

Jako každá jiná výrobní technologie i zpracování polymerbetonu vyžaduje dodržení specifických výrobních postupů.

Již od počátků používání polymerbetonů (což bylo zhruba v roce 1970), se objevili první automatické linky na přípravu směsi a odlévání, jelikož ruční míchání a dávkování směsi není produktivní a není zaručena opakovatelnost kvality směsi.[7]

Proces výroby odlitků z polymerbetonu se dá rozčlenit do pěti hlavních fází (viz obr. 22.).



Obr. 22. Fáze výroby

4.1.1 Dávkování

Dávkování lze provádět objemově dávkovacími šneky (pro sypké materiály) nebo také dávkovacími čerpadly (tekuté složky). Příklad dávkovacího (současně i míchacího) zařízení je na obr. 23. Využívá se i gravimetrického vážení na přesných vahách. Podstatnou výhodou u automatizované výroby je rychlá změna složení dávkované směsi.

Všechny složky (plniva, pryskyřice, tvrdidla, barvy atd.) jsou do stroje dodávány z oddělených zásobníků. Poté se podle zvolené receptury v co nejkratším čase nadávkují (u velice

pokročilých strojů toto může trvat 1s).Následně jsou tyto složky v míchačce promíchány do homogenní směsi. [7], [6], [8]



Obr. 23. Dávkovací a míchací zařízení

4.1.2 Míchání

Míchání polymerbetonové směsi probíhá dvoufázově.

První fáze: oddělené promíchání plniva různých frakcí podle křivky zrnitosti a promíchání tvrdidla s pryskyřicí.

Druhá fáze: smíchání všech složek na výsledné složení směsi. Důležité je, aby všechna zrna byla důkladně obalena pryskyřičným pojivem. Přestože má výsledná směs vyšší viskozitu, dobře se odlévá. [13], [7]

Pro míchání v první a druhé fázi se používají:

- Diskrétní korýtkové míchačky
- Plynulé míchání šneky

Obě metody jsou z hlediska kvality smáčení a stupně promíchání srovnatelné. Šnekové míchačky se ale na rozdíl od klasických míchaček lépe vymývají, mají vyšší výkon a jsou

snadněji automatizovatelné. Moderní dávkovače a míchací zařízení mají kapacitu 6- 24 tun za hodinu. Pro automatické vymývání šneků je možno použít malé množství acetonu. [8]



Obr. 24. Míchací stroj

4.1.3 Odlévání

Odlévání do forem může probíhat buď přímo z míchačky (obr. 25.), nebo pomocí licích pánví (obr. 26.). Protože odlití objemných odlitků může trvat i několik hodin, je možné, dle potřeby, nastavit dobu zpracovatelnosti směsí s epoxidovým pojivem v rozmezí 2 – 6 hodin.[7]

Vhodné je odlévat hned několik odlitků najednou, aby míchací zařízení bylo nepřetržitě v provozu a nemuselo být čištěno. Integrované funkční části (např. hydraulické vedení) odlitku musí být očištěny a odmaštěny, čímž se docílí dokonalá přilnavost. Tyto připravené díly se ustaví na jednotlivé desky formy, která je posléze smontována a ustavena na vibrační stůl k následnému odlévání.



Obr. 25. Odlévání do formy



Obr. 26. Odlévání polymerbetonu z licí pánve

4.1.4 Střásání a zhutňování směsi

Po odlití následuje setřásání směsi k zhutnění a odvzdušnění (relativním pohybem plniva se snižuje pórovitost). Zhutněním, vibrací, dusáním nebo lisováním je třeba zabránit nakypření k němuž došlo během míšení směsi. Rovněž je třeba odstranit vzduch v systému (ulpívající na částicích plniva). Mohou přitom pomoci odpěňující a povrchově aktivní přísady, pokud neruší polymerační reakci. Příznivých výsledků se dosahuje míšením ve vakuu. Zhutnění často účinně podpoří i mírné zvýšení teploty (na 30 až 70 °C), tím dojde ke snížení viskozity matrice. [21]

Mezi nejpoužívanější principy zhutnění patří střešovací stoly (obr. 27.). Rovněž se využívá vibračních motorů připevněných na vnější stranu formy. Vibrační tyče používané v betonářství se pro polymerní směsi neosvědčily. Tvar a rozměry formy ovlivňují sílu a frekvenci střešování. Obecně lze říci, že pokud střešujeme deskový typ formy je výhodnější použití vyšších frekvencí při malé síle. Při odlévání do velkorozměrových forem je tomu naopak.

Procedura střešování a zhutňování nesmí trvat příliš dlouho, aby nedošlo k narušení homogenity polymerbetonové směsi. Moderní střešovací stroje mají možnost plynule regulovat frekvenci do 70Hz. [8], [13], [14], [7].



Obr. 27. Střešovací stůl

4.1.5 Vytvrzování směsi

Při vytvrzování pojiv probíhá silně exotermická reakce, provázená téměř vždy objemovým smrštěním. Druh chemické reakce (polymerace, polyadice, polykondenzace), která probíhá při vytvrzování reaktoplastů nemá rozhodující význam, neboť případné vznikající nízkomolekulární vedlejší produkty je možno vázat vhodnou přísadou. [21]

Množství tepla, které vzniklo při vytvrzování je vázáno rychlostí s jakou materiál nabývá své pevnosti. Např. epoxidová pryskyřice $209 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ve 12 hodinách, nenasyčený polyester $222 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ v 2 hodinách. Pro porovnání cementový beton $293 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ v 70 hodinách. Vzhledem k nízké teplotní vodivosti polymerbetonů vzniká teplo rychleji, než může být disipováno. Podle druhu použitého materiálu tedy může dojít ke značnému vzrůstu teploty až na $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

V závislosti na způsobu vedení reakce (rychlost, teplota atd.), objemu tělesa, teplotní kapacitě plniva, podmínkách okolního prostředí atd. vznikají ve struktuře polymerbetonu složité stavy napětí. Toto se děje zejména v prostorách mezi částicemi.

Napětí je kombinací:

- napětí od smrštění při tvrdnutí
- účinků napětí teplotních změn během polymerace
- napětí v důsledku ochlazení složek s rozdílnými součiniteli teplotní roztažnosti

Výše zmíněné příčiny mohou vést k mikroporuchám struktur ještě před dosažením konečného vytvrzení.[21]

Během dalšího vytvrzování tepelný efekt zmizí a po zhruba 12-14 hodinách může být odlitek vyjmut z formy. Zpravidla pro výrobu jednoho odlitku v jedné formě stačí jeden pracovní den. Po 24 hodinách má odlitek konečné vlastnosti a lze jej dále mechanicky upravovat. Odpadá dvoutměsíční stárnutí, jak je to běžné u litinových odlitků. [7]

4.1.6 Dodatečné úpravy odlitků

Hotové odlitky lze po odstranění zbytků separátoru lakovat, byť to není nezbytně nutné, protože barva může být přimíchána do pojiva nebo může být použito obarveného plniva. Lesk je dán drsností povrchu vnitřních ploch formy.

Používanou metodou barvení povrchů odlitků je nanášení gelcoatu, tenké vrstvičky nestékavé probarvené pryskyřice na vnitřní povrch formy. Vrstvička se nanáší stříkáním bez vzduchu (airless system) nebo nátěrem v tloušťce 0,5 – 2 mm. Tato odolná a hladká vrstva se potom při odlévání spojí s odlévaným polymerbetonovým dílcem [7].

Vytvrzený polymerbeton lze upravovat metodami opracování přírodního kamene, tedy lze odlitky řezat, leštit, brousit, pískovat atd. Avšak dodatečné operace jsou úzce spojeny s dalšími náklady, které jsou nesrovnatelně vyšší než náklady na vylepšení forem. Proto je nutné dodatečné opracování omezit na minimum.[16] ,[8]

4.2 Konstrukční řešení, druhy a materiály forem pro zpracování polymerbetonů

Vysoká přesnost a kvalita odlévaných ploch kladou zároveň vysoké nároky na tuhost a jakost formy, což vyvolává vyšší pořizovací náklady. Dalším důležitým aspektem je nutnost zvážit časovou náročnost konstrukce v porovnání s jinými potenciálně použitelnými technologiemi pro zhotovení daného typu odlitku. [15]

Funkční plochy odlitku jsou umísťovány na nejtěžší místo formy – základovou desku. Základní tvar odlitku je navržen z jednoduchých rovinných elementů (tím je zároveň určen tvar formy). Forma je tvořena z desek, které jsou upevněny k základové desce a tvoří čelní a boční stěny. Na lící (horní) straně formy se nacházejí příčníky (tzv. mosty), které slouží k vyztužení formy. Na těchto deskách mohou být připevněny funkční části odlitku. Např. u obráběcích strojů to mohou být elektrická a hydraulická vedení, ocelové pouzdra, vodící lišty atd. (obr. 28.). Ke snížení celkové hmotnosti formy se využívají polystyrenová jádra.



Obr. 28. Zalitý ocelový profil v polymerbetonu pro upevnění lineárního vedení

Vyšší přesnosti odlévaných funkčních ploch lze docílit následným obráběním nebo následným odléváním za použití přesných přípravků v místnostech s regulovanou teplotou. Pro případné další připojení funkčních částí stroje lze využít spojení lepením.[15]

K nejčastějším materiálům pro výrobu forem patří:

- Dřevo
- Pěnové plasty
- Hliník

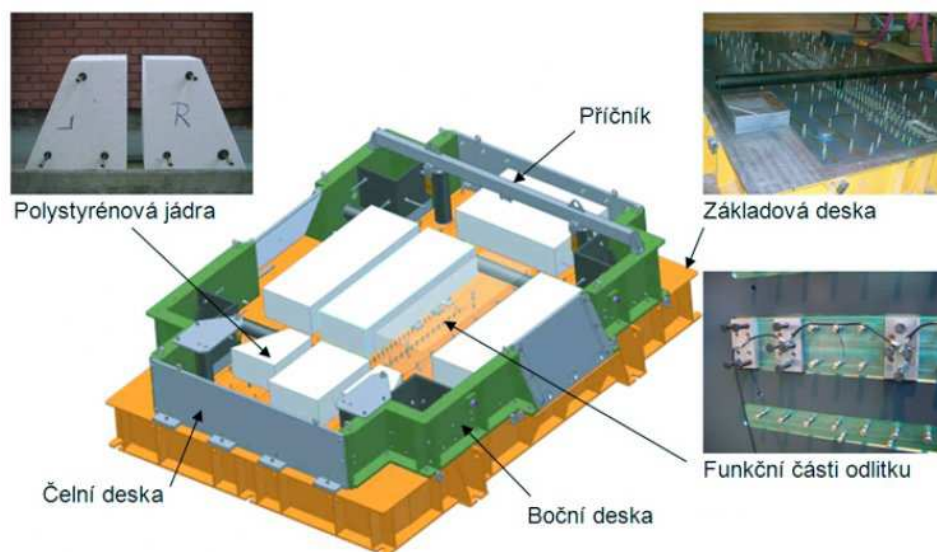
- Litina a ocel

Volba materiálu formy závisí na následujících faktorech:

- Počet plánovaných odlitků
- Požadovaná přesnost
- Kvalita povrchu odlitku

Základní části formy jsou patrné z obr. 29. Formu pro odlévání polymerbetonu tedy tvoří:

- Pevné dno
- Stěny
- Můstky
- Jádra



Obr. 29. Základní části formy

Pro odlévání prototypů se používají dřevěné a plastové (sklolaminátové) formy s tvarovou přesností $\pm 0,5$ mm (nízká tuhost a životnost).

Formy pro malosériovou výrobu (30-40 odlitků) jsou ze dřeva s potahem z hliníkových plechů. (dosažitelná tvarová pevnost až $\pm 0,2$ mm). Často využívané jsou také kombinované formy se základovou deskou z oceli, stěny a můstky jsou ze dřeva, plastu nebo hliníku.

Formy určené pro sériovou výrobu (300-1000 odlitků) jsou z oceli a litiny (maximální přesnost $\pm 0,1$ mm), vyznačují se vysokou tuhostí. Pro odlévání polymerbetonu do tohoto typu forem musí být jednoznačně určena vtoková soustava. [15], [8]

Při konstrukci formy je nutné zohlednit:

- Hmotnost vlastní formy
- Hmotnost polymerbetonové výplně
- Zatížení vibracemi při setřásání
- Tepelné zatížení při exotermické reakci u vytvrzování

Formy se před odléváním separují vhodným separátorem, aby nedošlo k přilepení směsi k formě, což by ztížilo proces vyjmutí odlitku z formy. [15]



Obr. 30. Montáž formy

4.3 Konstrukční zásady návrhu polymerbetonového dílu

Stejně jako odlitky ze šedé litiny a svařované konstrukce musí být i odlitky z polymerbetonu dimenzovány dle specifických pravidel a zásad.

Funkční plochy odlitku, tedy plochy, kde je nutné dosáhnout co možná nejvyšší přesnosti, jsou umísťovány na nejtuzší místo formy - základovou desku. Základní tvar odlitku je navržen z jednoduchých rovinných elementů, čímž je zároveň určen tvar formy.

Jádrová technika obvyklá při výrobě litinových dílů se u odlévání polymerbetonu nedá prakticky použít. Vnitřní prostory navržené z důvodu snížení hmotnosti odlitku nebo z důvodu funkce se mohou vytvářet jen speciálně vyráběnými díly nebo ztracenými jádry. Ztracená jádra mohou být z pěnových hmot potažených odolnou fólií, z dřevěných kvádrů nebo plastových trubek.

Obecně platí pravidlo, že minimální tloušťka stěny odlévané součásti je dána 5-8x násobkem největší frakce plniva.

Pro vyjmutí odlitku z formy je podle typu a velikosti formy nutný úkos $5^\circ \pm 2^\circ$. Na rozdíl od litiny jsou povoleny rozdílné tloušťky odlitku s prudkými přechody, protože vnitřní pnutí polymerbetonu je zanedbatelné.

Úplně se upouští od bohatého žebrování tolik charakteristického pro litiny. Nezpochybnitelnou výhodou dílů vyrobených z polymerbetonu je možnost použití integrovaných prvků s téměř neomezeným výběrem materiálu, z důvodu odlévání za studena, kdy je maximální teplota 80°C . [15], [6], [13], [14]

4.4 Ekologie a zpracování zbytků

Polymerbeton splňuje všechny požadavky na ekologický materiál. Vytvrzený materiál je chemicky inertní a bez zdravotních rizik. Nepotřebné odlitky nebo jejich části se mohou skladovat na skládkách stavebního odpadu. Betonové bloky se mohou po oddělení ostatních částí zpracovávat drcením. Tato drť se poté přidává např. do směsí na pro stavbu silnic a jiné potřeby ve stavebnictví.

4.5 Výztužné materiály a plniva polymerbetonů

Polymerbetony se mohou lišit celou řadou použitých materiálů, jak z hlediska rozmanitosti plniv, tak z hlediska různých výztužných materiálů. V této kapitole budou uvedeny další druhy užívaných plniv pro polymerbetony (také pro běžné cementové betony). Mezi hlavní výztužné materiály jsou zařazeny kovové, polymerní a skleněné výztuže.

4.5.1 Plniva

Jako plniva polymerbetonů se využívají přírodní i uměle vyráběné materiály. Z kameniva se využívá křemen, dolomit, živec, čedič, vápenec, břidlice a další. Tyto druhy plniva se liší svou zrnitostí. Dalším typem je uměle vyráběné pórovité kamenivo.

Pórovité kamenivo se využívá pro přípravu méně namáhaných lehčených betonů. Z vhodných hornin, které jsou schopné expanze se získává např. keramzit, vermikulit či experlit.

Keramzit (též uváděn pod názvem Liapor) získáváme vypálením vhodných jílu. Vypálený keramzit (obr. 31.) je na povrchu červenohnědý, slinutý a v řezu zrnem porézni.



Obr. 31. Vypálený keramzit

Dalším z plniv pro betony je pěnové sklo. Jedná se o anorganickou skleněnou ztuhlou pěnu s pravidelnými neprodyšně uzavřenými póry. Pěnové sklo má především tepelně izolační schopnost, nenavlhá, tudíž se navlhavost nemění i u betonu. Ve stavebnictví se v kombinaci s dalšími materiály využívá především pro izolaci střeš, stropů a podlah. [23]

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2 mohou být využité různé struktury plniva. Polymerbeton je dále možno plnit vláknitými plnivými jako jsou skleněná, uhlíková a aramidová vlákna. Cena těchto materiálů je však značně vyšší než je tomu u používaných přírodnin.

4.5.2 Výztužné materiály

Stejně jako běžný cementový beton lze také u polymerbetonu zvyšovat jeho užité vlastnosti celou řadou výztužných materiálů.

Nejdéle a nejčastěji jsou používány kovové materiály. Cementový beton vyztužený ocelovými tyčemi označujeme jako železobeton. Stavební oceli se dodávají jako výrobky zpracované válcováním, tažením nebo protlačováním. K vyztužování železobetonových konstrukcí se vyrábí celá řada průřezů ve tvaru tyčí (nebo drátků), které se případně spolu svařují. Tím jsou vytvářeny sítě s různě velkými oky. Tyče jsou při výrobě zality do betonu, tak aby při předpokládané deformaci byly natahovány (oproti betonu má ocel vysokou pevnost v tahu a velkou tažnost).[23], [24]

Betonářská ocelová výztuž se vyrábí především z ocelí třídy 10, některé druhy též z ocelí třídy 11. Stavební oceli jsou vyráběny s povrchem hladkým nebo upraveným vyválním výstupků či různých žebírek. Úprava povrchu má za účel zlepšení soudržnosti mezi ocelí a betonem. V nutných případech se používají betonářské výztuže i z korozivzdorných ocelí nebo opatřené organickými povlaky (nátěrové hmoty, převážně na epoxidové bázi) nebo kovovými povlaky (žárové zinkování ponorem). Důvodem je snížení rizika vzniku koroze výztuže po degradaci krycí vrstvy betonu v agresivním korozním prostředí. Zkorodovaná výztuž pak snižuje únosnost konstrukce. [23], [24], [22]

Pro nahrazení klasických ocelových výztuží se využívá vláknové výztuže do betonů a polymerbetonů. Takto vyrobené betony jsou označovány jako vláknobeton či drátkobeton.

Typy vláken pro prostorové vyztužení matrice polymerbetonu:

- Ocelová vlákna
- Uhlíková vlákna
- Skelná vlákna
- Polymerní vlákna

Ocelová vlákna přispívají ke zvýšení únosnosti, polymerní vlákna zvyšují například požární odolnost. Vlákna obecně zvyšují houževnatost materiálu. Prvky z vláknobetonu jsou subtilnější, čímž se snižují přepravní náklady v porovnání s klasickou betonářskou výztuží. Vláknobetonů a drátkobetonů se využívá v podlahových konstrukcích nebo také pro povrchové vrstvy betonu u tunelů. [24]

Tab. 8. Vlastnosti a dávkování vláknové výztuže

materiál	Pevnost v ohybu [MPa]	Délka vlákna [mm]	E-modul [GPa]	Dávkování [kg.m-3]
PP vlákna(proti smrštění)	700	12;19;38	110	0,9
PP vlákna (nosné vlákno)	700	38;58	110	2 až 18
skelná vlákna	1800	6 až 12	7 až 75	1 až 6
ocelová vlákna	900 až 1350	12 až 60	210	35 až 45



Obr. 32. Ukázky výztužných vláken

ZÁVĚR

Polymerbeton ve všech jeho modifikacích řadíme mezi částicové kompozity II. a III. typu. Jedná se o moderní konstrukční materiál, jehož hlavními znaky jsou polymerní matrice a plnivo, které má výztužný efekt. Zrnitost plniva se pohybuje zhruba v rozmezí 0,1mm až 20mm.

Použití polymerbetonů zahrnuje řadu odvětví. Zjednodušeně se dá říci, že dominuje stavebnictví a strojírenství. Ve stavebnictví je polymerbeton využit například pro fasádní systémy, svrchní vrstvy průmyslových podlah apod. V kombinaci se zvýšeným obsahem pryskyřičného pojiva se osvědčil pro opravy povrchu běžných cementových betonů narušených korozi. V oblasti strojírenství jednoznačně dominuje výroba odlitků z polymerbetonu. Ty jsou využity především pro konstrukci prvků obráběcích strojů jako jsou lože, rámy atd.

Při vzájemném srovnání polymerbetonu s cementovým betonem bylo zjištěna řada odlišností těchto materiálů. Mezi výhody odlitků zhotovených z polymerbetonové směsi patří vyšší pevnost v tlaku i tahu a mnohem větší odolnost koroznímu prostředí (okolní prostředí, mořská voda, chemikálie apod.). Cena cementového betonu je však mnohem nižší než u polymerbetonu. Ve strojírenských aplikacích byl polymerbeton porovnáván s dalším materiálem na odlitky – litinou. Zde polymerbetonové odlitky vykazují lepší schopnost tlumení než litina. Toho je využito právě u rámů a loží obráběcích strojů, dále pro základní desky měřicích strojů. Energetické nároky jsou několikanásobně nižší než u výroby odlitků z litiny. Zpracovatelské teploty se pohybují maximálně kolem 80°C. Rovněž doba výroby polymerbetonů je kratší než u litin. Odpadá zdlouhavé stárnutí a tepelné úpravy jak je tomu u litiny. Kvůli horším mechanickým vlastnostem polymerbetonu jsou zhotovovány rozměrnější odlitky než u litin.

Výrobu polymerbetonových odlitků lze rozdělit do pěti základních fází. Nejprve je nadvákována směs v přesně určených poměrech, poté dochází k jejímu smíchání. Následně probíhá odlití do forem z různých materiálů (dřevo, hliník, oceli, polymery). Materiál formy je určen především typem výroby. Pro odstranění vzduchu ve směsi probíhá zhuštění např. umístěním formy na střešací stůl. Poslední hlavní fází je polymerace pojiva rozptýleného ve směsi.

Fyzikální, chemické a technologické vlastnosti tento materiál předurčují pro širokou oblast aplikací. Nabízí se možnost kombinovat různé typy plniv, pojiv a také výztužných ma-

teriálů pro polymerbeton. V dalších bakalářských pracích by proto měl být polymerbeton podrobněji studován z pohledu výztužných materiálů. Na závěr je nutné dodat, že doposud se v literatuře a jiných zdrojích často liší nebo zaměňují významy slov minerální litina, polymerbeton a také pojem polymerem impregnovaný beton.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 193 s. ISBN 8021424435
- [2] DAĐOUREK, K.: *Kompozitní materiály – druhy a jejich využití*, Technická univerzita v Liberci, 1. vydání, 113 s., 2007, ISBN 978-80-7372-279-1
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno : CERM, 2002. 392 s. ISBN 8072042483.
- [4] MICHNA, Štefan . *Fakulta výrobních technologií a managementu, Univerzity J.E.Purkyně v Ústí nad Labem*[online]. 2008 [cit. 2011-05-25]. Progresivní technologie. Dostupné z WWW: <http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf>.
- [5] KŘENKOVÁ, Petra . *Měření tepelné vodivosti polymerních materiálů* [online]. Zlín : UTB, 2008. 90 s. Diplomová práce. UTB, Fakulta technologická . Dostupné zWWW:<http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/6973/k%C5%99enkov%C3%A1_2008_dp.pdf?sequence=1>.
- [6] LÁBUS, M. *Návrh polymerbetonového rámu obráběcího stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 117 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Holub.
- [7] MRÁZ, P., TALÁCKO, J.: *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*, ČVUT Praha, 1. vydání, 226 s., Nakladatelství ČVUT, 2006, ISBN 80-01-03540-9
- [8] Buksa, J. *Polymerbetonový rám svíslého soustruhu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bronislav Foller, Ph.D.
- [9] *Ústav fyzikálního inženýrství, FSI VUT v Brně* [online]. 2005 [cit. 2011-05-24]. Delta.fme.vutbr.cz.Dostupné z WWW: <<http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>>.
- [10] *Ústav materiálových věd a inženýrství, VUT Brno* [online]. 2008 [cit. 2011-05-24]. Ime.fme.vutbr.cz. Dostupné z WWW:

- <<http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Kestazeni/Technologie%20nekovovych%20materialu.pdf>>.
- [11] Polymerbeton. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 4. 6. 2006, last modified on 13. 7. 2009 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polymerbeton>>.
- [12] PATOČKA, J.: *Schneeberger Mineralgusstechnik - Minerální kompozity - výrobní možnosti, technologie, aplikace*, Schneeberger Mineralgusstechnik, s.r.o., přednáška na jednodenním odborném semináři: Kompozity ve stavbě strojů, Praha, 2007
- [13] *Schneeberger.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Mineral casting - Schneeberger. Dostupné z WWW: <<http://www.schneeberger.com/products/mineral-casting>>.
- [14] *Epucret* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Epucret Mineralgusstechnik. Dostupné z WWW: <<http://www.epucret.de/en/epufill-composite-structures/materials/>>.
- [15] KRUŠINA, Luboš . Minerální kompozit. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006, 12, [cit. 2011-05-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/mineralni-kompozit>>.
- [16] MANSON, John Alexander; SPERLING, Leslie Howard. *Polymer blends and composites*. London : Heyden, 1976. 513 s. ISBN 0-85501-215-3
- [17] *Fce.vutbr.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-05-24]. VUT Brno, Fakulta stavební. Dostupné z WWW: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/konference/Sekce_1_11/10_Prirodni_vedy.pdf>.
- [18] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha : Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [19] *Propodlahy.cz* [online]. 2003 [cit. 2011-05-24]. Pro podlahy. Dostupné z WWW: <<http://www.propodlahy.cz/katalog/detail.asp?id=1321>>.
- [20] SINGH RAGHAVA, Bhupendra . *Scribd.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Presentation on Polymer concrete. Dostupné z WWW: <<http://www.scribd.com/doc/33533356/Presentation-on-Polymer-concrete>>.

- [21] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Vyd. 1. Praha : SNTL, 1988. 325 s
- [22] SMOLÍK, Jan, et al. *Rcmt.cvut.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-05-25]. ČVUT, Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii . Dostupné z WWW:
<http://www.rcmt.cvut.cz/actions/20100225_emo2009/13_stavba_nosnych_soustav.pdf>.
- [23] *Stavební hmoty I*. Praha : ČVUT, 1976. 274 s
- [24] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara. *Ústav stavebního zkušebnictví* [online]. 2011 [cit. 2011-05-25]. Ústavu stavebního zkušebnictví fakulty stavební, VUT v Brně. Dostupné z WWW:
<http://147.229.27.214/vyuka/CI57/CI57_Specialni%20druhy%20betonu.pdf>.
- [25] *The Engineering ToolBox.com* [online]. 2009 [cit. 2011-05-25]. Stress, Strain and Young's Modulus. Dostupné z WWW:
<http://www.engineeringtoolbox.com/stress-strain-d_950.html>.
- [26] CHARVÁTOVÁ, H., JANÁČOVÁ, D., KOLOMAZNÍK, K., DVOŘÁK, Z., *Termofyzikální vlastnosti vybraných látek*, 1.vyd., Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín, 2009, 122s., ISBN 978-80-7318-787-3

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- PC - Polymer Concrete, polymerbeton
- SEM - Scanning Electron Microscopy , skenovací elektronová mikroskopie
- E - modul pružnosti v tahu (Youngův modul pružnosti) [MPa]
- G - modul pružnosti ve smyku [MPa]
- ν - Poissonův součinitel[-]
- PIC - Polymer Impregnated Concrete, polymerem impregnovaný polymerbeton
- MMA - methylmetakrylát
- PAN - polyakrylonitril
- PE - polyethylen
- PA - polyamid
- EP - epoxid
- UP - nenasycený polyester
- FP - furanové pryskyřice
- RV - relativní vlhkost [%]
- PMMA - polymethylmetakrylát

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma rozdělení kompozitních materiálů dle typu matrice.....	13
Obr. 2. Rozdělení kompozitů podle geometrického tvaru výztuže.....	14
Obr. 3. Polydisperzní soustava.....	15
Obr. 4. Různé druhy orientace vláken v matrici	18
Obr. 5. Slitina AgCu, zpevněná uhlíkovými vlákny	18
Obr. 6. Porovnání tahových diagramů	20
Obr. 7. Jevy na rozhraní matrice a vláken.....	20
Obr. 8. Složení polymerbetonu	22
Obr. 9. Příklad vzhledu struktury.....	23
Obr. 10. Mikrostruktura polymerbetonu (SEM).....	23
Obr. 11. Hmotnostní podíly	24
Obr. 12. Plniva	25
Obr. 13. Epoxidová pryskyřice pro polymerbetonové podlahy	27
Obr. 14. Porovnání tahových křivek	31
Obr. 15. Výsledek tlakové zkoušky polymerbetonu	32
Obr. 16. Odezva materiálu na změnu teploty.....	33
Obr. 17. Změna součinitele teplotní roztažnosti polymerbetonů.....	34
Obr. 18. Tlumící vlastnosti litiny.....	35
Obr. 19. Tlumící vlastnosti polymerbetonu	35
Obr. 20. Odolnost proti kyselinám.....	38
Obr. 21. Porovnání odolnosti solím	38
Obr. 22. Fáze výroby.....	40
Obr. 23. Dávkovací a míchací zařízení.....	41
Obr. 24. Míchací stroj	42

Obr. 25. Odlévání do formy	43
Obr. 26. Odlévání polymerbetonu z licí pánve	43
Obr. 27. Střásací stůl	44
Obr. 28. Zalitý ocelový profil v polymerbetonu pro upevnění lineárního vedení.....	46
Obr. 29. Základní části formy	47
Obr. 30. Montáž formy	48
Obr. 31. Vypálený keramzit	50
Obr. 32. Ukázky výztužných vláken	52

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Orientační hodnoty pórovitosti systémů	16
Tab. 2. Porovnání pevnosti v tahu	16
Tab. 3. Vlastnosti některých vláken.....	17
Tab. 4. Typy plniva	24
Tab. 5. Technické parametry COM 2	27
Tab. 6. Porovnání vlastností polymerbetonu s tradičními materiály	32
Tab. 7. Shrnutí vlastností	37
Tab. 8. Vlastnosti a dávkování vláknové výztuže.....	52

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA PI: CD obsahující bakalářskou práci