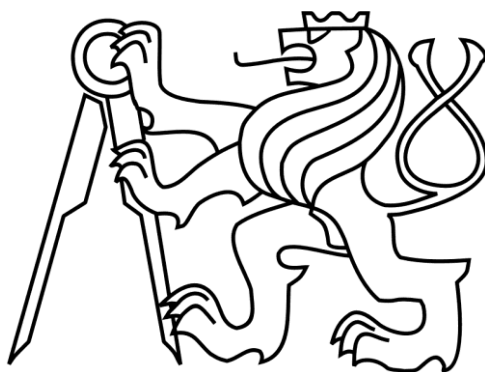


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra mechaniky (K 132)



Bakalářská práce

Rok 2016

Jméno: Petr Holub



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: Holub	Jméno: Petr	Osobní číslo: 409819
Zadávací katedra: Katedra mechaniky (k132)		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Návrh jemnozrné betonové směsi pro vyztužení uhlíkovými vlákny	
Název bakalářské práce anglicky: Design of fine grained concrete mixture for carbon fibre reinforced	
Pokyny pro vypracování: 1) Vypracujte rešerši současného stavu problematiky. 2) Navrhněte a otestujte různé varianty jemnozrné cementové směsi vhodné pro vyztužování náhodně rozptýlenými uhlíkovými mikro vlákny. 3) Ze zjištěných výsledků vyberte nejvhodnější směs, navrhněte kompozitní materiál vyztužený karbonovými mikro vlákny, stanovte jeho materiálové a mechanické vlastnosti. 4) Shrňte dosažené výsledky a vzájemně je porovnejte.	
Seznam doporučené literatury: Vybrané články z databáze WoS, Science Direct	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 25. 2. 2016	Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2016
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>25.2.2016</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	---

Návrh jemnozrnné betonové směsi pro
vyztužení uhlíkovými vlákny

Design of Fine Grained Concrete Mixture for
Carbon Fibre Reinforced

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího pana Ing. Pavla Tesárka Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Poděkování

Nejvíce bych chtěl poděkovat především svým rodičům, za umožnění studia na vysoké škole, neustálou podporu a trpělivost, které se mi dostávalo. Dále bych chtěl velice poděkovat panu Ing. Pavlu Tesárkovi Ph.D. a panu Ing. Janu Trejbalovi za umožnění a uskutečnění výzkumné činnosti. Za jejich cenné rady, připomínky, ochotu, trpělivost, neustálé dohlížení a výpomoc s experimenty. Práce vznikla v rámci řešení projektů Centra pro nanotechnologie ve stavebnictví FSV ČVUT v Praze a Společné laboratoře technologií polymerních nanovláken Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky. Experimentální část práce byla podpořena z prostředků ČVUT v Praze v rámci projektu SGS16/201/OHK1/3T/11 a díky podpoře projektu GA ČR GA15-12420S.

Anotace:

V uvedené bakalářské práci je především popsán a vysvětlen princip návrhu jemnozrné betonové směsi za účelem efektivního vyztužení uhlíkovými vlákny. Je zde názorně popsán a vysvětlen jak postup při návrhu jemnozrné betonové matrice, tak vlivy jednotlivých složek na soudržnost betonové matrice s uhlíkovými vlákny. Na základě studia teoretických pramenů a znalostí o vyztužování betonových kompozitů skleněnými, polypropylenovými, polyolefinovými a jinými vlákny, bylo připraveno a otestováno několik vzorků betonových matic. Každý ze vzorků byl testován destruktivními i nedestruktivními metodami za účelem zjištění jejich mechanicko-fyzikálních vlastností. Hlavním předmětem experimentů bylo zjištění vlivu jednotlivých složek betonové matrice na soudržnost matrice s povrchem uhlíkových vláken. Dalším předmětem bylo vyhodnocení výsledků a použití nejlepší betonové matrice k dalšímu experimentálnímu testování jako je změna mechanicko-fyzikálních vlastností a jejich povrchové úpravě.

Klíčová slova: *uhlíkové vlákno, betonová matrice, kompozitní materiál, soudržnost vláken.*

Abstract:

This Bachelor thesis primarily described and illustrated principle and design of fine-grained concrete mixture which is effectively reinforced by carbon fibres. Thesis clearly described and explained a procedure of design for fine-grained concrete mixture. Effects of individual components on a consistency of the concrete mixture with carbon fibres is described here too. Several samples of concrete mixtures were prepared under a theoretical studies and knowledges of reinforcement in concrete mixtures by glass, polypropylene, polyolefin and other fibres. Each samples was tested by destructive and non-destructive methods to determine their mechanical and physical properties. The main object of experiments was verification of a influence of individual components in concrete mixture on mixture cohesion with a surface of carbon fibres. Evaluation of results and use of the best concrete mixture for experimental testing like a change of mechanical and physical properties and their surface alteration are the second object of this Bachelor thesis.

Keywords: *carbon fiber, concrete matrix, composite material, consistency fiber.*

Obsah

1	Úvod	2
2	Současný stav problematiky	3
2.1	Cementový kompozit vyztužený nekovovou rozptýlenou mikrovýztuží	3
2.2	Složky cementového kompozitu s ohledem na použití mikrovýztuže	5
2.2.1	Hydraulické pojivo	5
2.2.2	Písek a mikroplnivo	9
2.2.3	Voda a vodní součinitel	12
2.2.4	Přísady a příměsi	13
2.3	Rozptýlená mikrovýztuž	14
2.3.1	Nekovová rozptýlená výztuž	14
2.3.2	Uhlíková vlákna	15
2.4	Soudržnost cementové matrice s uhlíkovou mikrovýztuží	17
2.5	Plazmatická úprava uhlíkových vláken	21
3	Experimentální část	23
3.1	Vliv doplnění mikrostruktury betonové matrice pomocí mikroplniva	23
3.1.1	Složení referenčních nevyztužených matric	24
3.1.2	Zpracovatelnost a konzistence	25
3.1.3	Dynamický modul pružnosti	26
3.1.4	Pevnost v tahu za ohybu	27
3.1.5	Tlaková pevnost	30
3.1.6	Objemová hmotnost a porozita	32
3.1.7	Shrnutí	34
3.2	Vyztužení betonové matrice pomocí uhlíkové mikrovýztuže	35
3.2.1	Rozptýlení uhlíkové mikrovýztuže	36
3.2.2	Složení referenční a vyztužené matrice	38
3.2.3	Pórovitost	40
3.2.4	Pevnost v tahu za ohybu	42
3.2.5	Tlaková pevnost	44
3.2.6	Shrnutí	45
3.3	Vliv konzistence na mechanické vlastnosti vyztužených matric	46
3.3.1	Objemová hmotnost	46
3.3.2	Pevnost v tahu za ohybu	49
3.3.3	Tlaková pevnost	51
3.3.4	Shrnutí	52
4	Výsledky řešení a diskuse	53
5	Závěr	54
6	Citovaná literatura	55
7	Seznam obrázků	57
8	Seznam tabulek	59

1 Úvod

Obecně nejrozšířenějším a nejpoužívanějším stavebním materiálem v dnešní době je beton, nebo jeho známější verze železobeton. Množství vyrobeného betonu se z hlediska celosvětové produkce řadí na první místo hned před ocel. I u nás zaujímá první příčku jako nejpoužívanější stavební materiál pro nosné konstrukce. Beton je kompozitní stavební materiál, který se skládá z pojiva, plniva, vody, přísad a příměsí. Každá složka betonu propůjčuje a modifikuje charakteristické vlastnosti betonu. Nejznámější charakteristikou betonu je jeho vysoká tlaková pevnost a nízká pevnost v tahu (nejčastěji se udává desetinová), která se nejčastěji eliminuje pomocí ocelové výztuže přidávané do betonu. Ocelová výztuž se používá zejména z důvodu stejné teplotní roztažnosti jako beton a její vysoké pevnosti v tahu. Vyztužený beton pomocí ocelové výztuže se nazývá železobeton. Díky ocelové výztuži se beton může používat i jako tažený prvek (ne tak často), nebo ohýbaný prvek, kde v tlaku působí beton a v tahu působí především ocel. Stejně důležitou nevýhodou betonu je jeho smrštění, tedy nepatrná změna objemu, která je způsobená postupným odpařováním vody při hydrataci. Vedlejším produktem smrštění jsou tak zvané smršťovací mikrotrhliny, kterými může kapilárně pronikat voda k ocelové výztuži. Ocelová výztuž, která je vystavena působení klimatických vlivům a je nedostatečně ochráněná (pasivována) brzy začíná korodovat a ztrácet své mechanické vlastnosti. U takové konstrukce může dojít až ke kolapsu, tedy zhroucení konstrukce. Smrštění betonu lze v určitém ohledu zabránit pomocí speciální rozptýlené výztuže. Nejčastěji používaná rozptýlená výztuž je z ocelových drátků. Beton vyztužený pomocí těchto drátků se nazývá drátko-beton. Bohužel drátky jsou stejně jako běžná ocelová výztuž velice náchylné na korozi. Proto se v poslední době začalo využívat dalších uměle vytvořených materiálů, jako jsou skleněná vlákna, uhlíková vlákna, polypropylenová vlákna, polyolefinová vlákna, čedičová vlákna a mnoho dalších. Beton vyztužený pomocí této výztuže se nazývá vlákno-beton. V této bakalářské práci se zabývám především vyztužením betonové matrice uhlíkovými vlákny. Z důvodu jejich vysoké ceny a menší dostupnosti na trhu je zapotřebí zapracovat je co nejefektivněji do betonové matrice, aby byl co nejlépe využit jejich potenciál. Proto se v této práci zabývám především doplněním betonové matrice a její mikrostruktury tak, aby uhlíková vlákna vykazovala co možná nejlepší soudržnost s jednotlivými složkami betonu. Prioritně se tedy zabývám jejich vlivem na změnu vodního součinitele, ovlivnění měrného povrchu a dalšími vlastnostmi. Předložená bakalářská práce slouží jako demonstrace možnosti zlepšení tahových pevností prostého betonu pomocí rozptýlené uhlíkové mikrovýztuže a jejich dalším vlivům.

2 Současný stav problematiky

2.1 Cementový kompozit vyztužený nekovovou rozptýlenou mikrovýztuží

Pod pojmem nekovová rozptýlená výztuž se nejčastěji myslí organická výztuž a výztuž na bázi polymerů, které svými specifickými vlastnostmi modifikují výsledné vlastnosti betonové matrice. Jedná se především o vlákna vyráběná recyklováním plastů, a jiných polymerů, například skla. Nekovová a polymerní vlákna dělíme dle materiálu:

- polypropylenová,
- polyetylenová,
- polyesterová,
- nylonová,
- PVA vlákna,
- polyolefinová,
- skleněná vlákna,
- uhlíková vlákna,
- čedičová vlákna,
- konopná vlákna,
- celulózová vlákna aj. [1].

Pojem rozptýlená mikrovýztuž definuje všechna rozptýlená vlákna v betonové matrici do průměru 0,30 mm. Dále je dělíme podle způsobu uspořádání na jednovláknovitá, monofilamentická (monofilamentic fibre) a vláknitá, fibrilovaná (fibril fibre). Vlákna v průměru většího než 0,30 mm jsou tzv. makrovlákna [1]. Charakteristika jejich uspořádání definuje i schopnost rovnoměrného rozptýlení v betonové matrici. Jednovláknovitá, monofilamentická, rozptýlená výztuž nebude v betonové matrici tvořit tak velká seskupení jako vlákna vláknitá a lze je tedy lépe rovnoměrně rozptýlit do betonové matrice. Na obrázku č. 1 vidíme rozdíl mezi vlákny fibrilovanými a monofilamentickými.



Obrázek 1: Fibrilovaná polypropylenová vlákna (vlevo) [2], monofilamentická polypropylenová vlákna (vpravo) [3].

Charakter rozptýlených mikrovláken bude mít zásadní vliv na výsledné vlastnosti betonové matrice a dále je můžeme rozlišit dle modulu pružnosti E [GPa] na:

nízkomodulová	PP (polypropylen) vlákna, nylonová vlákna, PE (polyetylen) vlákna,
vysokomodulová	PVA (polyvinylalkohol) vlákna, skleněná vlákna, uhlíková vlákna, aramidová (kevlar) vlákna [4].

Modul pružnosti a soudržnost rozptýlených mikrovláken s betonovou matricí budou ovlivňovat charakter porušení betonové matrice. Nízkomodulová vlákenná výztuž bude díky vysoké průtažnosti prokazovat mnohem vyšší deformace, zejména průhyby, oproti vláknům vysokomodulovým. Ty budou mít deformace menší, ale bude docházet ke křehkému porušení tzv. křehkému lomu. Nízkomodulová vlákna také nebudou výrazněji ovlivňovat tahové pevnosti výsledných betonových matric, ale budou zlepšovat houževnatost, absorpci rázové energie a omezení, případně vyrušení smršťovacích mikrotrhlin. Objemové změny betonových konstrukcí vyvolané změnami teplot můžeme rovněž omezit pomocí nízkomodulové vlákenné výztuže [1], [4].

Vysokomodulová vlákenná výztuž bude pozitivně modifikovat tahové pevnosti prostého betonu a umožní částečnou absenci konstrukční výztuže. Z ekonomického hlediska se zvýší cena 1 m^3 prostého betonu, ale sníží náklady na pracnost vázání konstrukční ocelové výztuže. Charakter porušení bude odlišný od nízkomodulové vlákenné výztuže. Při namáhání ohybem dojde nejprve k vyčerpání tahové pevnosti betonu, kde v rozptýlené výztuži bude vzhledem k jejich vysoké tahové pevnosti pouze malé tahové napětí. Během toho dojde v betonové

konstrukci k rozevření první mikrotrhliny. Rozptýlená vysokomodulová vlákenná výztuž přenese napětí z porušeného místa do místa neporušeného, kde se zvýší tahové napětí a dojde opět k rozevření mikrotrhliny. Tento způsob porušení zvýší tahovou pevnost betonu a omezí jeho křehkost, zvýší houževnatost a sníží náchylnost na změnu zatížení. Neopomenutelnou výhodou vlákenné výztuže v betonové matici je také menší náchylnost na soustředěné bodové zatížení [4]. Uplatnění vysokomodulové vlákenné výztuže např. uhlíkových a skleněných vláken bude zejména v oblasti špatně vyztužitelných oblastí, tenkostěnných betonových profilů a v agresivním prostředí.

2.2 Složky cementového kompozitu s ohledem na použití mikrovýztuže

2.2.1 Hydraulické pojivo

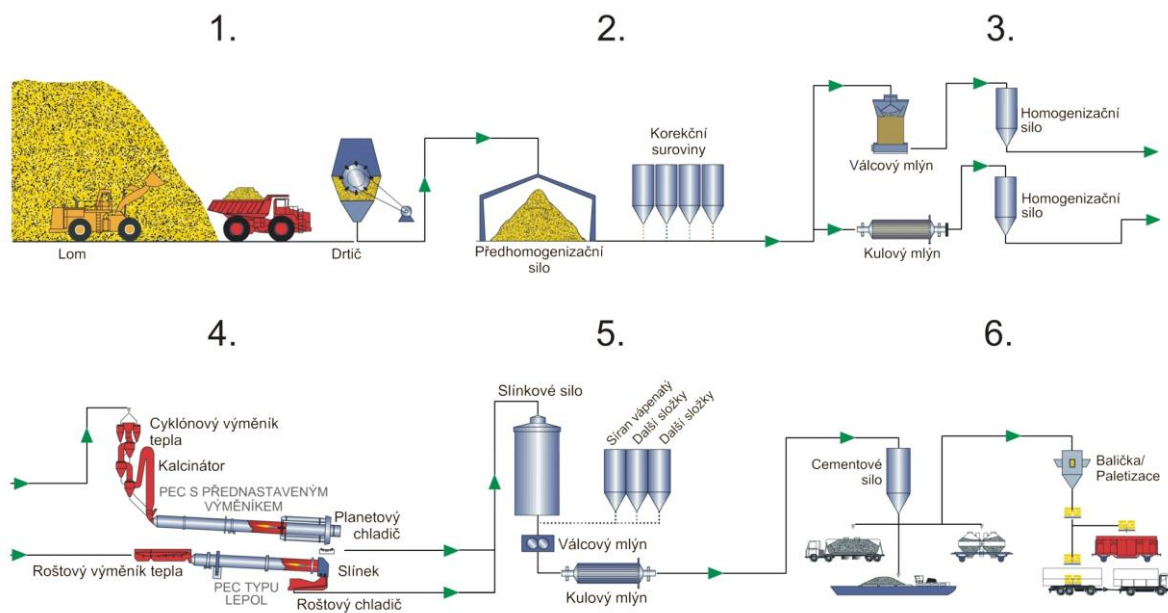
Název pojivo je odvozen od slova pojít, tedy spojovat jednotlivé prvky dohromady. I u betonových směsí se výrazem pojivo obecně myslí hmota, která má za úkol spojovat jednotlivé části směsi, tedy plnivo. Vlastnosti pojiva významně udávají vlastnosti a chování betonové směsi jako celku. Běžně dostupná a používaná pojiva jsou na bázi hydraulických pojiv, vzdušných (vápenných) pojiv, pojiv na bázi plastů a pryskyřic. Hydraulická pojiva se rozdělují dle chemického složení na:

- křemičitanové (silikátové),
- hlinitanové (HC),
- ostatní na bázi železitanů, chromitanů atd.

Nejčastěji používaná hydraulická pojiva jsou křemičitanová (silikátová), jejich chemické složení odpovídá především:

- 59-67 % hm. CaO (oxid vápenatý),
- 16-26 % hm. SiO₂ (oxid křemičitý),
- 4-8 % hm. Al₂O₃ (oxid hlinitý),
- 2-5 % hm. Fe₂O₃ (oxid železitý),
- 0,4-0,9 % hm. K₂O (oxid draselný),
- 0,2-0,6 % hm. Na₂O (oxid sodný).

Množství oxidu vápenatého (CaO) udává tzv. stupeň sycení vápnem. Čím více se blíží stupeň sycení k hodnotě 1, tím více kvalitní cement máme. Hydraulická pojiva se mohou vyrobit z horniny nazývané septárium nebo častější formou a to přidáním hydraulických oxidů tzv. hydraulitů do páleného (nehašeného) vápna. Nejčastěji používané hydraulické oxidy jsou: SiO_2 (oxid křemičitý), Al_2O_3 (oxid hlinitý), Fe_2O_3 (oxid železitý) a MgO (oxid hořečnatý). Smíchané pálené vápno a hydraulické oxidy se dále ukládají do rotačních pecí, kde jsou společně smíchány a vypalovány za vysokých teplot 1450 °C na mez slinutí. Na obrázku č. 2 je stručně uvedena výroba Portlandského cementu.



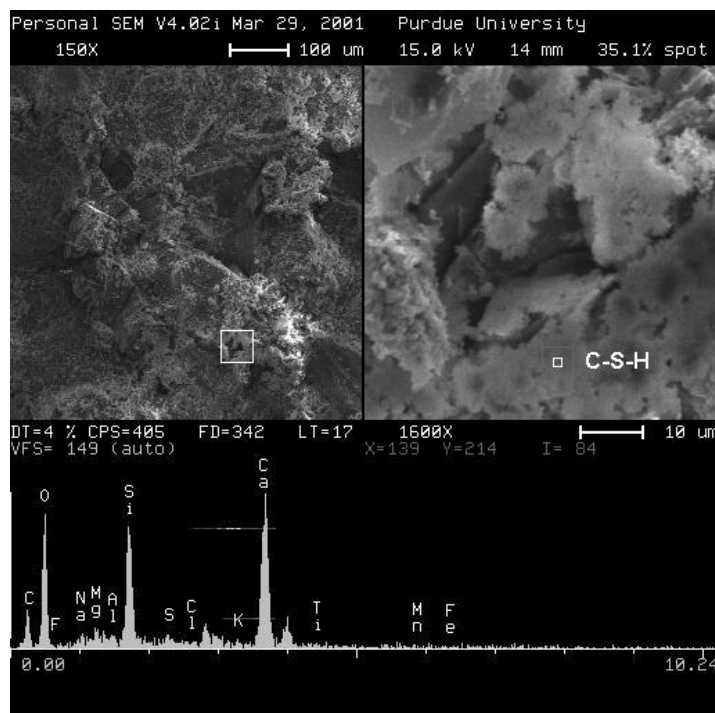
Obrázek 2: Výroba cementu [5].

Během vypalování nehašeného vápna a slínkových minerálů dochází k fyzikální přeměně skupenství zpět na pevné skupenství. Jednotlivé prvky vznikající při fyzikální přeměně se nazývají:

- alit (trikalcium silikát) $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$,
- belit (dikalcium silikát) $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$,
- celit (trikalcium aluminát) $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$,
- felit (tetrakalcium aluminát ferrit) $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ [6].

Výše uvedené prvky jsou hlavní slínkové minerály a jejich poměrné zastoupení udává charakteristické vlastnosti hydraulických pojiv. Po vypálení jednotlivých prvků na mez slnutí dochází k prudkému ochlazení pod 100 °C, při čemž se zamrazí nejreaktivnější slínkový minerál alit, který by se jinak rozpadl na oxid vápenatý CaO a belit $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Množství zamraženého alitu udává hlavní charakteristiku a reaktivitu hydraulických pojiv. Výsledný produkt je prozatím v pevné fázi, která prochází řadou mlýnů, kde se slínek rozemele na požadovanou jemnost. Vzniklé pojivo je velice pevné a odolné, tuhne a tvrdne i pod vodou a ve vodě se nerozpouští. Nevzniká zde žádný vápenný cyklus. Po smíchání hydraulického pojiva s vodou nejrychleji reaguje alit, za vzniku C-S-H gelu, uvolňuje teplo a dává cementové směsi počáteční pevnosti. Nejpomaleji pak reaguje belit, který dohydratovává až po 28 dnech [7]. Hydrát obou krystalických struktur se nazývá C-S-H gel (*calcium silicate hydrate*), který je znázorněn na obrázku č. 3. Přesné složení a struktura C-S-H gelů je velice obtížná, v literatuře se uvádí složení z:

- tobermorit ($5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- afwillit ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$)
- hillebrandit ($2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$)
- xonolit ($6\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$) [5], [8].



Obrázek 3: Snímky ze SEM mikroskopu C-S-H gelu [8].

V mikrostruktúře cementové a betonové matrice při použití vysokomodulové rozptýlené výztuže mohou vznikat nehomogenity, které jsou významné zejména na rozhraní vlákno – cementový tmel. Na tomto rozhraní vznikají při hydrataci cementu málo nasycené vrstvy C-S-H gelů, které jsou v tomto rozhraní často doplněny nežádoucími produkty hydratace, portlanditem, ettringitem, vodními a vzduchovými mikropóry [9].

Kontrolováno je u surovinového cementu především jemnost mletí, tedy měrný povrch [cm^2/g] cementu. Čím jemněji je cement mletý, tím rychleji a lépe hydratují jednotlivá cementová zrna, díky kterým se urychlí nárůst počátečních pevností. Běžně dostupný cement má jemnost mletí 250-450 m^2/kg . V dlouhodobém i krátkodobém horizontu jsou pevnosti jemně mletého cementu vyšší, protože zhydratuje více cementových zrn než u méně mletého cementu. U méně mletého cementu se také častěji stává, že nezhydratovaný cement plní i funkci mikroplniva. Při použití jemně mletého cementu se pevnost může navýšit řádově i o 20 % oproti cementu méně mletého, a to především z důvodu dokonalejšího zhydratování všech cementových zrn [10]. Samotná hydratace cementu se popisuje jako pochod, u kterého se voda váže na ostatní suché látky. Bezvodé, suché látky se mění na látky gelovité až krystalické a rozděluje se do tří fází [6]:

- I. fáze – indukční
- II. fáze – přechod hydratačních produktů do pevného skupenství
- III. fáze – vytvoření stabilní struktury hydratované cementové pasty [11].

I. Indukční fáze je charakteristická smáčením zrn cementu a první reakce slínekových minerálů. Okamžitě reaguje podstatná část alitu, přibližně 80 %, za vzniku hydrosilikátového gelu a portlanditu. Druhá etapa indukční fáze probíhá cca po 1-2 hodině, kdy dochází k nárůstu viskozity suspenze, nastává úbytek silikátů a vytvoření prvního C-S-H gelu.

II. Fáze hydratace cementu je charakteristická přechodem cementového C-S-H gelu do pevného skupenství. Tento produkt hydratace způsobuje přibližování cementových zrn v důsledku prorůstání jednotlivých krystalů a vytváření základní mikrostruktury cementového kamene.

III. Fáze hydratace cementu je charakteristická vytvořením stabilní struktury cementového kamene. Dochází k rekrystalizaci hydratačních produktů vlivem difuze vody a také k hydrataci nehydratovaných cementových zrn. Zmíněná fáze se také nazývá dozrávání cementu, která trvá přibližně 28 dní. Během III. fáze hydratace nám dohydratuje i druhá důležitá složka cementu, belit [11].

Výsledná hydraulická pojiva mají vysoké $\text{pH}=12,45$ díky kterému ochraňují ocelovou výztuž. Tento proces se nazývá pasivování výztuže, které je jedním z hlavních kladů hydraulických pojiv. Bohužel vysoké pH betonové matrice negativně snižují, některé přidávané příměsi. Tím je například křemičitý úlet. Je tedy nutné sledovat množství přidávaných příměsí a výsledné pH při použití kovové vlákenné výztuže [12].

Do hydraulických pojiv se také za účelem modifikace jejich vlastností přidává mnoho příměsí. Nejčistější hydraulické pojivo je cement portlandský CEM I, dále jsou pak cementy s různým typem příměsí jako je CEM II (portlandský směsný cement), CEM III (vysokopeční cement), CEM IV (pucolánový cement), CEM V (směsný cement). Pevnostní třídy cementů se rozdělují do tří kategorií, které jsou: CEM 32,5, CEM 42,5 a CEM 52,5. Číslo za označením „CEM“ udává zaručenou charakteristickou pevnost pro horní 95% kvantil [1]. Množství hydraulického pojiva je velice důležité při navrhování betonových matic pro vyztužení rozptýlenou výztuží. Hraje zde roli především množství, které se výrazně změní přidáním jemné rozptýlené výztuže, která zvyšuje měrný povrch plniva. Je tedy zapotřebí většího množství cementu aby obalil větší měrný povrch [cm^2/g]. Nejde tedy jednoznačně vyztužit již hotovou a odzkoušenou matici a požadovat stejnou zpracovatelnost při stejném podílu jemných částic. Je tedy nutno brát v úvahu zvětšení měrného povrchu v matici a přizpůsobit ji návrhu vyztužení. Mezi jemnou rozptýlenou výztuž patří především uhlíková a skleněná vlákna. Kde skleněná vlákna mají průměr okolo 14 μm a uhlíková okolo 7 μm .

2.2.2 Písek a mikroplnivo

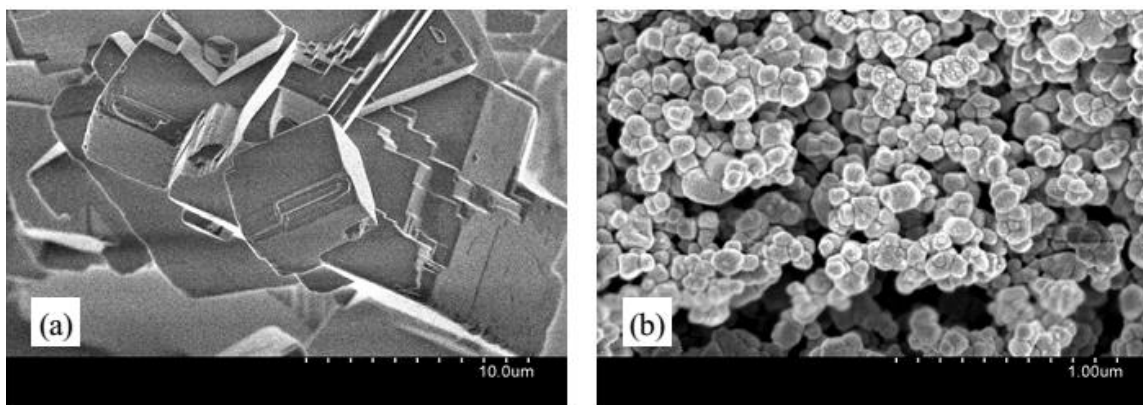
Název plniva je odvozený od slova plnit, vyplňovat, a i zde charakter slova vyjadřuje jeho funkci. Plnivo slouží k doplnění pojivové pasty, která za správného použití plniva získává mnohem lepší vlastnosti, zejména pak tlakovou pevnost a Youngův modul pružnosti. Plniva by v betonové směsi mělo být tolik, aby pojivo bylo schopné obalit a vzájemně provázat všechny zrna. Pokud tak není, nebo je plnivo frakčně nerovnoměrně zastoupeno vznikají tzv. hnízda, tedy místa bez pojiva, která nemají žádnou z mechanicko-fyzikálních vlastností zbylé okolní směsi. Jak bylo již výše zmíněno, plnivo musí být rovnoměrně zastoupeno, to znamená

pozvolně stoupající křivky zrnitosti bez výrazných schodů a změn stoupání. Ve směsi pak dochází k rovnoměrnému zastoupení jednotlivých frakcí plniva a zvyšují tím pevnost samotné betonové směsi. Tuto křivku můžeme zjistit prosévací zkouškou přes síta o velikostech od 0,063-63 mm. Křivka zrnitosti pak vychází z hmotnostních podílů plniva nepropadlých sítím o dané velikosti. U plniva se také zkouší tvarový index, který je poměrem nejkratší strany zrna k nejdelšímu. V ideálním případě se tvarový index blíží k hodnotě 1 (dokonale kulaté). Dalšími zkouškami plniva jsou laboratorní zkoušky na obrusnost, nasákavost, mrazuvzdornost, chemické složení, hustotu, objemovou hmotnost, sypanou hmotnost, tlakovou pevnost a mnoho dalších vlastností ovlivňující kvalitu plniva. Nejčastěji používaná plniva jsou anorganického původu v podobě kameniva, šterků a písků. Je to například makadam, křemičité písky, žuly, mramory a další většinou lokálně dostupné horniny. Kameniva může být velice mnoho druhů. Přírodní kamenivo je drcené, těžené, říční, mleté, až po recyklované materiály jako jsou: recyklovaný beton, recyklovaný plast, drcené sklo, drcená keramika a další. Neopomenutelným typem plniva jsou tzv. lehčená plniva, vylehčují betonovou směs udávající zejména lepší tepelně technické vlastnosti. Tyto plniva mohou být na bázi polystyrenů, perlit nebo na bázi tufů, popílků a jílu. Charakter porušení betonové směsi se nejčastěji navrhuje tak, aby nejslabším prvkem směsi bylo pojivo, tedy aby nedocházelo při tlakovém namáhání k drcení kameniva. Proto kamenivo musí být dostatečně únosné.

Jemnozrná plniva jsou definována velikostí zrn do 4 mm, jedná se tedy o frakci 0/4 [13]. U jemnozrného plniva, písku, nás především zajímá jeho měrný povrch [cm^2/g], který především ovlivňuje vodní součinitel a množství dávkovaného cementu. Je tedy potřeba zvýšení množství pojiva, aby obalilo větší měrný povrch zrn. Ze stejného důvodu je i za potřebí mnohem více záměsové vody. U jemnozrných betonových matic částečně omezíme vznik makrotrhlin, hmota se zdá být kompaktnější, než u betonových matic s větším kamenivem, kde mohou vznikat tzv. hnízda, tedy špatně probetonovaná místa, nebo místa s malým obsahem pojiva. Jemnozrná plniva tedy zlepšují homogenitu výsledné betonové směsi, lépe vyplňují vzniklé póry, lépe aktivují rozptýlenou nekovovou výztuž, kolem které se nebudou tvořit nehomogenity v podobě pórů a mikrotrhlin.

Mikroplnivem, nebo mikrofillrem se rozumí inertní (chemicky nereaktivní) plnivo do průměru všech zrn 0,125 mm. Mikroplnivo spadá do kategorie příměsí do betonu, tedy zaujímající více jak 5 % hmotnosti betonové směsi. Mikroplniva jsou nejčastěji prodávána formou křemenné, nebo vápenné moučky, stavebními odpady jako je jemně mletý cihelný střep, beton, skelné moučky a jiné. Hlavní pozitivní vlastností mikroplniv je zvýšení homogenity, hutnosti betonové matrice, pohyblivosti a ochraně proti segregaci kameniva. Pojmem segregace

kameniva se definuje odmísení pevných, těžkých částic plniva od vody a pojiva. Zlepšení homogenity a hutnosti betonové matrice zvyšujeme i její tlakovou a tahovou pevnost [MPa], odolnost proti chemickému prostředí, mrazuvzdornost atd. Ekonomickou výhodou mikroplniva je možnost částečné náhrady cementu při stejných mechanických vlastnostech. Nevýhodou mikromletého plniva je jeho velký měrný povrch [cm^2/g] a vysoká vodonáročnost. Díky které je zapotřebí zvýšení vodního součinitele, nebo přidání přísad v podobě plastifikátorů a superplastifikátorů [12]. V experimentální části této bakalářské práce bylo použito jako mikroplnivo mikromletý vápenec, proto mu bude věnována pozornost v následující kapitole.



Obrázek 4: Snímky ze SEM mikroskopu, znázorňující mikrostrukturu mikromletého vápence [14].

Mikromletý vápenec

Jedná se o anorganické minerální plnivo, které se získává pomocí mletí drceného vápence. Takto připravená surovina musí obsahovat více jak 75 % CaCO_3 a obsah jílových podílů nesmí překročit 1,2 g/100 g. Základními měřeními parametry mikromletého vápence jsou granulometrie a jemnost mletí. Díky snadnému mletí je mikromletý vápenec v cementové pastě zastoupen ve formě velmi jemných částic, a tím homogenizuje strukturu cementového tmelu. Hlavní požadavek je, aby propad sítem 0,063 mm byl větší než 70 %. Jemná zrna vápence působí v betonu jako nukleační centra pro krystaly portlanditu a urychlují hydrataci silikátových a aluminátových fází. Díky tomu mohou ovlivnit počáteční nárůst pevností v betonu a celkový stupeň hydratace. S vyšším množstvím mikromletého vápence se hydratace v počátečních fázích urychluje, ale z dlouhodobého hlediska probíhá hydratace cementu s mikromletým vápencem pomaleji. Jemně mletý vápenec se ale nechová jen jako inertní plnivo, protože se dokáže účastnit i hydratačních reakcí. Zejména se jedná o hydrataci trikalciumaluminátu ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) ze slínku za vzniku kalciumkarbonátaluminát hydrátu

($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaCO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Trikarbonát může v pozdějších fázích transformovat na stabilnější monokarbonát. Optimálních vlastností mikromletého vápence bylo dosaženo při náhradě 20 % vápenného prachu z hmotnosti cementu. Rozlití i pevnosti v tlaku do 20% náhrady cementu vápencem vzrostly až na 20 %, kde nabývaly nejvyšší hodnoty. Při větším množství než 20 % rozlití i pevnost razantně klesá. Několik studií se zabývalo hledáním vlivu mikromletého vápence na tvrdnutí betonu. Výsledkem bylo dvojí zjištění. V první řadě je to značné urychlení počáteční fáze hydratace, zvyšují se tedy počáteční pevnosti. Zrna vápence tvoří zárodky, které zvyšují pravděpodobnost, že se částice rozpuštěné v C-S-H gelu srazí a poté rychleji spojí. Tento efekt je patrný pouze v počátečních stádiích tvrdnutí a po 28 dnech je již zanedbatelný. Druhým efektem je lepší pojení ostatních složek betonové směsi [12].

2.2.3 Voda a vodní součinitel

Vodní součinitel charakterizuje poměrné zastoupení vody a cementu. U používání mikromletých plniv, mikro rozptýlené výztuže a ostatních složek do průměru zrn 0,125 mm se musí hmotnostní poměry všech složek také započítat do vodního součinitele. [12] Vodní součinitel se značí nejčastěji symbolem W/C (Water/Cement) a výrazně ovlivňuje zpracovatelnost směsi a její porozitu na mikro úrovni. S přidáním většího množství vody na daný objem cementu dosáhneme lepší zpracovatelnost až samonivelační schopnosti. Bohužel při zvýšení poměru vody vznikají v betonové matici během tuhnutí a tvrdnutí mikropóry, které významně negativně ovlivňují pevnost výsledné betonové matrice [11]. Mikropóry vznikají nejvíce při hydrataci cementu, kde se při zvýšeném hydratačním teplu odpařuje voda a zanechá za sebou nevyplněná místa (oslabí kompaktnost směsi). Makropóry pak vytvářejí systémy, kam se může vzlínáním dostat externí voda, narušovat krycí vrstvu výztuže, nebo korodující rozptýlenou výztuž. Ze stejného důvodu ovlivňuje vodní součinitel i mrazuvzdornost.

Jak již bylo zmíněno, při vyztužení betonové matrice rozptýlenou vysokomodulovou mikrovýztuží se zvětšují měrné povrchy [cm^2/g] betonové matrice. Musíme tedy brát v úvahu zvětšení množství cementu a tudíž i vody, což na druhou stranu může negativně ovlivnit pevnost. Záleží hlavně na velikosti (průměrech) rozptýlené výztuže a její nasákavosti/vodoodpudivosti. Vodoodpudivá výztuž nebude vyžadovat přidání vysokého množství vody. Zatím co nasákavá vlákna výrazně ovlivní vodní součinitel. Při zvýšeném množství vody může dojít i k tzv. segregaci, kameniva. Tomu to jevu můžeme zabránit pomocí chemických stabilizátorů a mikroplniva.

Na druhé straně snížení vodního součinitele na minimum snižuje zpracovatelnost, omezuje porozitu v rozsahu makro, mikro pórů a zvyšuje výsledné pevnosti. U ultra vysokohodnotných betonů (UHPC), které jsou charakteristické svou tlakovou pevností vyšší než 115 MPa, se snižuje vodní součinitel až na hodnotu 0,15-0,2 (Firma LafargeHolcim), zde je však velká část vody nahrazena plastifikátory, nebo spíše superplastifikátory, které zajistí dobrou zpracovatelnost i při tak nízkém vodním součiniteli. Je tedy možné zpracovat rozptýlenou výztuž do betonové matrice i při velice nízkém vodním součiniteli zachovat kompaktnost směsi s minimálním množstvím pórů a trhlin vzniklých odpařováním záměsové vody při hydrataci.

2.2.4 Přísady a příměsi

Hmotností zastoupení přísad používaných do betonu se udává dle normy EN 206 do 5 % hm. všech ostatních složek betonové matrice. Příměsi jsou definovány jako všechny složky přidávané do betonové matrice za účelem modifikace jejích vlastností nad 5% hm. všech ostatních složek.

Přísady ovlivňující vyztužení rozptýlenou mikrovýztuží

Nejčastěji používané přísady do betonových matic s rozptýlenou mikrovýztuží jsou plastifikátory a super plastifikátory, které jsou nejčastěji na bázi polykarboxylátů, polyakrylátů a lignosulfonátů. Jsou přidávány do betonových směsí ve formě tekutiny, nebo prášků. Mají za úkol zlepšit zpracovatelnost při stejném vodním součiniteli, nebo zmenšit vodní součinitel při stejné zpracovatelnosti. Polykarboxylátové plastifikátory a superplastifikátory pozitivně ovlivní pevnost betonu, zejména zvýší tlakovou pevnost, avšak s vyšším použitím snižují Youngův modul pružnosti [GPa]. Beton má tedy nejméně 115 % pevnost oproti referenčním vzorkům [15], ale snížený modul Youngův modul pružnosti a tím zvýšené průhyby. Polyakrylátové superplastifikátory nejen že zlepšují zpracovatelnost a snižují spotřebu vody, ale dokáží i rovnoměrně rozptýlit vodu v matrici ke všem cementovým zrnům.

Při používání rozptýlené výztuže v betonové matrici se doporučuje použití superplastifikátoru, abychom omezili vznik mikro a makro pórů a zachovali dobrou zpracovatelnost. Při snížení porozity zamezíme vzniku dutin kolem rozptýlené výztuže a můžeme tak lépe využít její potenciál [16]. Pokud bychom nepoužívali mikrofillery jako mikro plnivo bylo by nutné použití stabilizátorů betonu, které by zabraňovali segregaci kameniva.

Příměsi, které ovlivní vyztužení uhlíkovou mikrovýztuží

Nejčastěji používané příměsi do betonu jsou latentně hydraulické příměsi. Chemicky reagují spolu s cementem, a zvyšují tak pevnost výsledné směsi. Rozdělují se dle pucolánové aktivity, která udává množství reaktivního CaO mg/g příměsi. Nejlépe reaguje metakaolín a mikrosilika (křemičitý úlet). Pucolánová aktivita těchto příměsí se pohybuje okolo 680-760 mg CaO/g. Měrné povrchy jsou pak 18,6 m²/g pro mikrosiliku a 6,8m²/g směsí pro metakaolín. Jsou tedy velice jemně mleté, a proto mohou značně ovlivnit měrné povrchy celé matrice. Další výhodou těchto mikromletých materiálů je jejich doplnění mikrostruktury betonové matrice. To znamená, že i v případě kdy nezhydratují mohou plnit funkci mikrofillerů a doplnit tak mikrostrukturu matrice jako mikroplnivo. Obecně se udává, že množství těchto příměsí by nemělo přesáhnout množství 20-25 % z hmotnosti cementu. Další latentně hydraulické příměsi jsou pak phonolith, popílek, vysokopecní struska aj. [17].

2.3 Rozptýlená mikrovýztuž

2.3.1 Nekovová rozptýlená výztuž

Nejčastěji používaná vlákna ve stavebnictví jako rozptýlená mikrovýztuž betonových kompozitů je na bázi skleněných, uhlíkových, polymerních a keramických vláken. Ostatní typy vláken jako jsou vlákna živočišného původu nejsou tak vhodná a proto se ve stavebnictví příliš nepoužívají.

Polymerní vlákna

Do této kategorie patří hlavně vlákna zpracovávaná z ropy a odpadních látek jako jsou plasty. Nejčastěji používaným polymerním vláknem jsou vlákna polypropylenová. Polymerní vlákna mají oproti jiným typům výztužných vláken horší pevnostní charakteristiky a to především tahové. Používají se tedy hlavně z důvodu zabránění rozevírání mikrotrhlin v betonu během jeho vysychání. Také teplotní odolnost mají nižší než ostatní typy výztužných vláken. Ovšem z požárního hlediska kdy působí rozptýlená polymerní výztuž s betonovou matricí jako celek, je požární odolnost takto vyztuženého kompozitu lepší než u obyčejného železobetonu [18], [10]. Druhy polymerních vláken jsou popsána v kapitole 2.1.

Skleněná vlákna

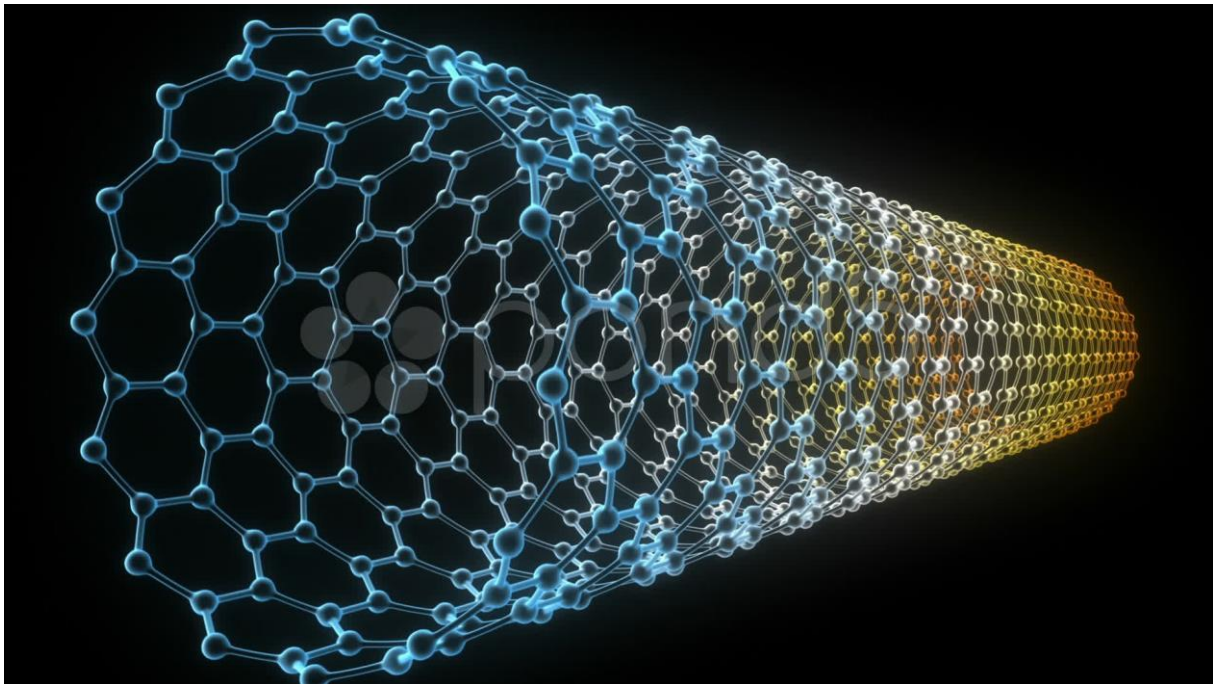
Výroba skleněných vláken se provádí metodou tažením, zvlákňováním, nebo foukáním ze skelné taveniny. Předpřipravená vlákna se pak vytahují na válcích do požadovaného průměru a jemnosti. Mechanické vlastnosti skleněných vláken se nejvíce přibližují vláknům uhlíkovým. Průměr skleněných vláken se nejčastěji pohybuje od 6-20 μm . Mají výbornou chemickou odolnost proti kyselému prostředí a kyselinám, bohužel jsou náchylné na degradaci v trvale alkalickém prostředí za vysokých teplot. Je tedy nutné do betonových konstrukcí použít speciální vlákna s přidáním oxidu zirkoničitého [7], [18].

Keramická vlákna

Složení keramických vláken bývá nejčastěji na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 , oxidu křemičitého SiO_2 a karbidu křemíku. Vstupní suroviny keramických vláken jsou dobře lokálně i cenově dostupné a proto se hojně využívají i ve stavebnictví. Hlavními vlastnostmi je jejich vysoká odolnost proti agresivnímu prostředí a vysoká teplotní odolnost (až 1600 $^{\circ}\text{C}$). Hlavní využití nalézají ve výrobě tepelných izolací a jako výztuž pro vysokoteplotní aplikace [18].

2.3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou tvořena nejméně z 90 % čistého uhlíku, při vyšším zastoupení uhlíku cca 98 % a více se jedná o vlákna grafitová. Atomy uhlíku jsou do sebe vzájemně spojené a vytváří paralelně orientované krystaly. Krystaly jsou orientovány paralelně ke střednici vlákna, a proto dosahuje v tomto směru nejlepších mechanických vlastností, jedná se tedy o anizotropní materiál. Průměry uhlíkových vláken se pohybují v rozmezí od 5-7 μm , kde vlákna menšího průměru mají díky přesné speciální technologii lepší vlastnosti. Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken snadno překonají všechny ostatní typy výztužných vláken. Mají vysoký modul pružnosti, který se pohybuje až okolo dvojnásobku modulu pružnosti oceli, přibližně 400 GPa. Také disponují vysokou mezí pevnosti dosahující až k hodnotám 6000 MPa v tahu, tedy skoro 12ti násobné pevnosti oproti oceli. Dalšími výbornými vlastnostmi uhlíkových vláken je vysoká požární odolnost a odolnost proti jakémukoliv chemickému prostředí. Na obrázku č. 5 můžeme vidět stavbu uhlíkového vlákna a jeho orientaci.



Obrázek 5: Paralelní orientace atomů ke střednicové ose uhlíkové nanotrubic [19].

Bohužel hlavní nevýhodou uhlíkových vláken je jejich malé přetvoření na mezi porušení, udává se 1-2 %, což činí uhlíková vlákna velice křehká a nepřetvárná. Betonový kompozit vyztužený uhlíkovými vlákny bude vykazovat pod zatížením velice malé deformace, ale při překročení meze pevnosti dojde k náhlému porušení bez varování. Dojde tedy opět ke křehkému lomu jako u prostého betonu. Důvodem použití rozptýlené uhlíkové výztuže mohou být tenkostěnné betonové profily jako náhrada konstrukční výztuže a zlepšení tahových pevností, u špatně dostupných míst jako částečná náhrada tahové výztuže, nebo při potřebě zlepšení absorpce energie, např. u betonových pražců, nebo mostních dílů [20]. Rozptýlená uhlíková mikrovýztuž se také může použít jako náhrada konstrukční výztuže u předpjatých nosníků a vazníků.

Uhlíková vlákna lze vyrobit z tzv. prekurzorů, kde nám jako prekurzor slouží buď PAN (polyakrylonitril) vlákna, nebo jako prekurzor slouží černouhelné a ropné smoly. Z každého prekurzoru jsou uhlíková vlákna trochu odlišných vlastností. Nejvyšší tahové pevnosti dosahují vlákna, která mají jako prekurzor PAN vlákna. Nejvyšších modulů pružnosti pak mají vlákna vyráběná z černouhelných a ropných smol [18]. Výroba v obou metodách probíhá stejně, nejdříve se připraví prekurzor, což obnáší tavné rozvlákňování, nebo zvlákňování v roztoku. Připravený prekurzor se pak stabilizuje a oxiduje, dále probíhá karbonizace, grafítizace a výsledná povrchová úprava, která se nazývá sizing [18].

Sizingem se upravují uhlíková vlákna za účelem lepší soudržnosti s plasty a jinými kompozity. Nejčastěji používaný sizing uhlíkových vláken bývá na bázi nezatvrdlých epoxidových pryskyřic, nebo polyuretanů. Zlepšení soudržnosti uhlíkových vláken s cementovou matricí lze také dosáhnout pomocí tzv. studené plasmu.

2.4 Soudržnost cementové matrice s uhlíkovou mikrovýztuží

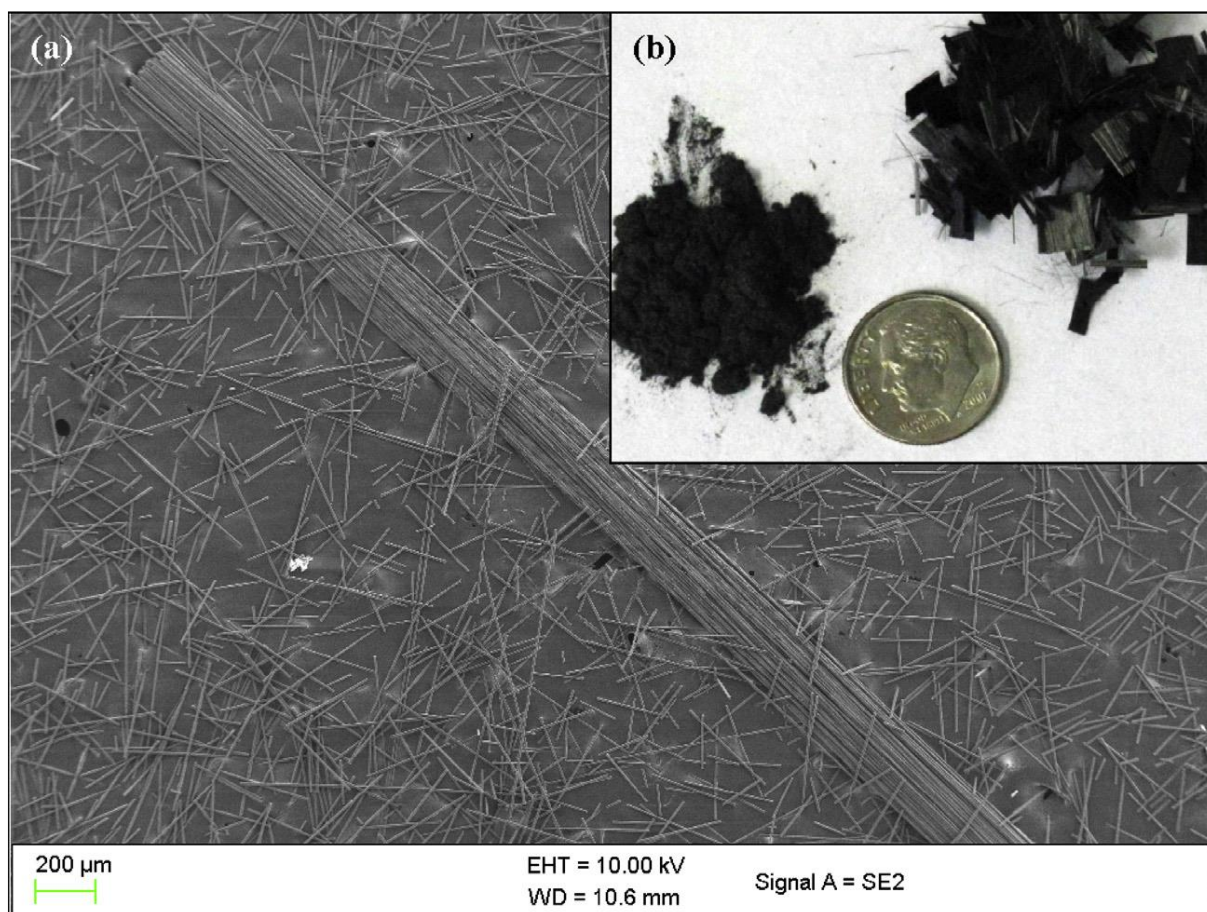
Soudržnost cementové matrice a rozptýlené uhlíkové mikrovýztuže bude nejdůležitější hlavně ve fázi hydratace na rozhraní C-S-H gelu a vláken, kdy se nám mohou vnášet do matrice nehomogenity v podobě mikro a makro pórů, nebo mikrotrhlin po vysychání vody v kompositu. Mohou vznikat dutiny okolo rozptýlené výztuže, které můžeme vyplnit mikroplnivem, nebo vhodnou příměsí [9]. Důležitý vliv na soudržnost bude mít i smáčivost vláken, tedy kontaktní úhel s vodou. Smáčivost je definována jako vlastnost chování kapaliny ve styku s pevnou látkou a může nám predikovat chování vláken i ve spojení s pryskyřičným lepidlem [18].

Soudržnost uhlíkových vláken byla dokázána ve spojení s cementovou matricí. Jako první byla uhlíková vlákna porovnána spolu se skleněnými v cementové matrici spolu s výztužnou tkaninou. Byly porovnány dva typy matric a dva typy vyztužení:

- | | |
|----------------|--|
| 1. matrice M30 | pevnost v tlaku: 62,3 MPa, tahová pevnost: 2,16 MPa, |
| 2. matrice M45 | pevnost v tlaku: 36,1 MPa, tahová pevnost: 1,74 MPa. |

Oba typy matric byly vyztuženy 1 % hm. rozptýlenými vlákny a výztužnou tkaninou. Ukázalo se, že v matrici M30 dosáhla lepších tahových pevností skleněná vlákna, zatímco v matrici M45 dosáhla lepších tahových pevností vlákna uhlíková. Ovšem síla na mezi rozevření trhlin byla u obou typů matric výrazně lepší u vláken uhlíkových cca o 1/4. Dále byly porovnány deformace jednotlivých vyztužených matric. Měřeny byly zejména posuny uprostřed zkoušených normových těles. I zde dosáhla uhlíková vlákna lepších výsledků, než vlákna skleněná. Oba typy rozptýlené výztuže výrazně zvýšily mez na vzniku a rozevření trhlin vyztužených matric a to 2,5 až 4. Této skutečnosti lze nejlépe využít třeba u předpjatých prefabrikovaných konstrukcí, kde jedním z aspektů posuzování je mez na rozevření trhlin, nebo u vodo-stavebních betonů, kde se snažíme o minimální až žádné rozevření trhlin (dekomprese průřezu) [21].

Následující výzkum prokázal dobrou soudržnost uhlíkových vláken a cementové matrice. Použita byla hybridní kombinace uhlíkové mikro a makro výztuže, kterou můžeme vidět na obrázku č. 6.



Obrázek 6: Styk mikro a makro uhlíkové rozptýlené výztuže s cementovou matricí [22].

Výzkum prokázal nejvhodnější kombinaci hybridního vyztužení a to poměrem 2,02 % hm. makro výztužných vláken a 2,02 % mikro výztužných vláken. Cementová matrice vykazovala tahových pevností 5,7 MPa a referenční nevyztužená cementová matrice vykazovala tahové pevnosti 3,3 MPa [22]. Tlakové pevnosti se příliš od referenčních nelišily. Místo použití rozptýlených uhlíkových vláken můžeme také použít uhlíkové nanotrubičky, které pozitivně nepřispívají tahovým pevnostem, ale rapidně navýší pevnosti tlakové.

Zkoušeny byly nanotrubičky o průměru 7 μm a délkách 10, 30, 100 a 500 μm . Tento výzkum prokázal zvýšení tlakových pevností zkoušených matric na cca dvojnásobnou hodnotu oproti referenčním vzorkům. Nejvyššího zlepšení tlakové pevnosti dosáhly uhlíkové nanotrubičky o délce 10 μm .

Referenční matrice: tlaková pevnost: $38,3 \pm 8,2$ MPa, tahová pevnost $2,3 \pm 0,4$ MPa,
vyztužená matrice: tlaková pevnost: $61,8 \pm 0,8$ MPa, tahová pevnost $2,3 \pm 0,2$ MPa.

Je patrné, že zde uhlíkové nanotrubičky doplňovaly pouze mikrostrukturu cementové matrice. Dalším aspektem tohoto výzkumu bylo porovnání absorpce energie, zejména pohlcení a utlumení zvuku. I zde se prokázalo zlepšení u vyztužených matic [23].

Ve výzkumu, kde byla použita pojiva na bázi pryskyřic, bylo opět dosaženo značné zlepšení tahových pevností oproti referenčním vzorkům. Dále byla také prokázána velice dobrá soudržnost s pryskyřičným pojivem a možnost modifikace povrchu uhlíkových vláken pomocí studené plazmy. Tedy s vlákny, kde se studenou plazmou upravuje, oxiduje jejich povrch. Po vyzkoušení na malých referenčních vzorcích byla uhlíková vlákna aplikována do reálných betonových prahů, kde se zkoušelo opět pohlcení energie a útlumu zvuku při simulovaných testech. Testy simulovaly projíždění rychlovlaku, pohlcení vibrací a i zde bylo dosaženo mimořádných výsledků [20].

Bohužel ani jeden z nalezených článků přímo nesouvisel s reálným vyztužením betonové matrice s plnivem, přísadami a příměsemi. Bylo tedy nutné provést nulté experimenty před samotnou experimentální částí bakalářské práce, jako bylo zjištění reálného chování uhlíkového vlákna v běžné, neupravené betonové matici.

Jak již bylo zmíněno v přecházejících kapitolách, při vyztužení betonové matrice rozptýlenou výztuží dochází ke značným změnám potřeby množství cementu, vody a vyšší energetické náročnosti na zpracování. Pro názorný příklad jsem vyrobil klasickou betonovou matici s jemnozrným kamenivem frakce 0/2, vodním součinitelem $W/C=0,7$, spotřeby cementu 450 kg/m^3 a pokusil se jí vyztužit 2 % hm. uhlíkovými vlákny o délce 10 mm. Zmíněný pokus byl součástí nultých experimentů experimentální části této bakalářské práce a jeho výsledek je uveden na obrázku č. 7 a 8.



Obrázek 7: Zkušební těleso bez optimalizování množství cementu, vody a mikroplniva.



Obrázek 8: Makrofotografie povrchu neoptimalizovaného zkušebního tělesa.

Z obrázku je patrné, že veškerý podíl jemných částic (cementu) se navázal na uhlíková vlákna a zanechal tak plnivo bez jakéhokoliv pojiva. Zmíněný jev vznikl z důvodu velkého povrchového napětí uhlíkových vláken, která mají schopnost na sebe velice dobře vázat vodu a jemné částice. Je tedy patrné, že pokud chceme vyztužit betonovou matici uhlíkovými mikrovlákny je zapotřebí zvětšit podíl jemných, mikromletých částic, nebo množství cementu. Dále je patrné, že je betonová matrice velice chudá na vodu. Uhlíková vlákna totiž pojmu velké množství sama do sebe. Je tedy zapotřebí i veliké zvětšení vodního součinitele, což má

neblahý dopad na výslednou porozitu. Než zvyšovat množství vody je možné použít kvalitní superplastifikátor, který nahradí část záměsové vody. Z obrázku je také patrné, že jsou uhlíková vlákna nedokonale rozptýlená, shlukují se k sobě a nebylo možné je lépe zapracovat do matrice. Bylo tedy na řadě vyzkoušení několik typů rozptýlení v betonové matrici.

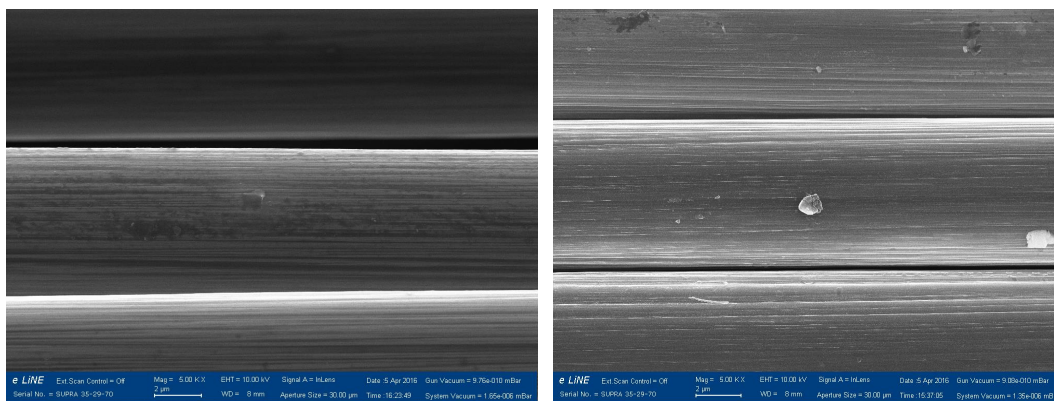
Následným aspektem rozptýlení uhlíkových mikrovláken je jejich povrchová úprava. Jak již už bylo řečeno, uhlíková vlákna se prodávají s povrchovou úpravou sizingem. Z výzkumů je také patrné, že povrchová úprava se dá také modifikovat studenou plazmou za účelem dosažení lepší smáčivosti a soudržnosti s betonovou matricí.

2.5 Plazmatická úprava uhlíkových vláken

Plazma se jinými slovy nazývá čtvrté skupenství hmoty, které obsahuje vysoce ionizované plyny. Plazmu můžeme dělit dle teploty na vysokoteplotní a nízkoteplotní. Plazmatického stavu lze dosáhnout několika metodami: Zvýšený tlak, zvýšená teplota, nebo zvýšený elektrický výboj. Povrchové modifikace pomocí plazmatické úpravy se rozděluje do několika fází:

- čištění: povrch materiálu je fyzicky bombardován ionty, při tomto jevu dochází k odstranění prachu a nečistot,
- aktivace: povrch materiálu se bombarduje různými molekulami plynů, které na povrchu vytvoří radikály vyvolávající lepší smáčivost,
- leptání: povrch materiálu se vystaví působení plynu, materiál se naleptá a vzniklé nečistoty se s výpary odpaří,
- povlakování: vhodný plynný monomer je vháněn do plazmatické komory polymeruje se pomocí plazmy a zůstává na povrchu [18].

Na obrázku č. 9 můžeme sledovat změnu povrchové úpravy uhlíkového vlákna nízkoteplotní plazmou, která byla součástí nultých experimentů této bakalářské práce. Doba aplikace studené plazmy činí 4 min.



Obrázek 9: Povrch uhlíkového vlákna před aplikací a po aplikaci studené plazmatické úpravy.