



Fakulta stavební
Faculty of Civil Engineering



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie



VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ SE ZVÝŠENOU ELEKTRICKOU VODIVOSTÍ

Properties of cement-based composites with enhanced electrical
conductivity

Bakalářská práce

Praha 2017

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Fiala, Ph.D.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Walda Jméno: Milan Osobní číslo: 410191
Zadávající katedra: K123 - Katedra materiálového inženýrství a chemie
Studijní program: Stavitelství
Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vlastnosti cementových kompozitů se zvýšenou elektrickou vodivostí
Název bakalářské práce anglicky: Properties of cement-based composites with enhanced electrical conductivity

Pokyny pro vypracování:

Bakalářská práce bude obsahovat teoretickou část a experimentální zkoumání uhlíkových vláken v cementovém kompozitu a jejich následné ovlivňování elektrické vodivosti.

Seznam doporučené literatury:

Moderní beton - Mario Collepardi

Self-Sensing Concrete in Smart Structures - Baoguo Han et al.


Odborné články na vědeckém webu Web of Science

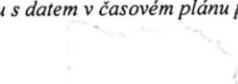
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Lukáš Fiala, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 15.2.2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


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“.

15.2.2017

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení:

Čestně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vlastnosti cementových kompozitů se zvýšenou elektrickou vodivostí“ vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze, dne 13.2.2017

.....

Milan Walda

Dále souhlasím, aby má bakalářská práce byla používána ke studijním účelům na ČVUT fakultě stavební bez mého písemného souhlasu.

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Fialovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval doc. Jiřímu Litošovi, Ph.D. a doc. Ing. Karlu Kolářovi, CSc. za poskytnutí rad, prostor a přístrojů experimentálního centra.

BIBLIOGRAFICKÉ ÚDAJE:

Název bakalářské práce: Vlastnosti cementových kompozitů se zvýšenou elektrickou vodivostí

Pracoviště: Katedra materiálového inženýrství a chemie fakulty stavební ČVUT

Autor: Milan Walda

Studijní obor: Realizace pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Fiala, Ph.D.

Rok obhajoby: 2017

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá účinností uhlíkových vláken jako funkčního plniva v běžném cementovém kompozitu pro zvýšení elektrické vodivosti. Práce je členěna do dvou na sebe navazujících částí – teoretické a experimentální. V teoretické části popisují klasický cementový kompozit, cementový kompozit s přidaným funkčním plnivem a jejich vlastnosti. Dále se zaměřuji na tzv. „chytré“ betony, jejich využití, zlepšené vlastnosti a jakými funkčními plnivy jich lze dosáhnout. Obsahem experimentální části jsou výsledky výzkumného měření mechanických a fyzikálních vlastností cementového kompozitu po přidání uhlíkových vláken. Hlavním cílem práce bylo zjistit, jaké hmotnostní zastoupení uhlíkových vláken v cementovém kompozitu bude ideální pro zvýšení elektrické vodivosti, a přitom neoslabí mechanické vlastnosti. Proto byly provedeny zkoušky pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku dle příslušné normy pro ztvrdlý beton ČSN EN 12390-1. Po všech provedených zkouškách lze konstatovat, že přimíchání i malého množství uhlíkových vláken do běžného cementového kompozitu, má kladný vliv na zlepšení elektrické vodivosti a pevnosti v tahu za ohybu.

Klíčová slova: cementový kompozit, uhlíková vlákna, vodivá plniva, elektrická vodivost, tepelná kapacita, chytré konstrukce

BIBLIOGRAFICAL IDENTIFICATION:

Title of the bachelor thesis: Properties of cement-based composites with enhanced electrical conductivity

Workplace: Department of Materials Engineering and Chemistry, Faculty of Civil Engineering CTU

Author: Milan Walda

Study program: Implementation of buildings

Supervisor: Ing. Lukáš Fiala, Ph.D.

Year of presentation: 2017

Abstract: The bachelor thesis is focused on efficiency of carbon fibers as a functional filler in regular cement composite to increase electrical conductivity. The thesis is divided into two consecutive parts – theoretical and experimental. The theoretical part describes classical cement composite, cement composite with added functional filler and their properties. Then I focus on so-called “smart” concrete and its utilization, improved properties and what functional fillers they can be achieved with. The experimental part contains results of research measurements of mechanical and physical properties of the cement composite after addition of carbon fibers. The main aim of this thesis was to find out percolation threshold of amount of carbon fibers in the studied cement composite and to find out whether it does not influence negatively mechanical properties. Therefore, experiments have been conducted to determine the tensile strength, during the flexion and under the pressure according to the relevant standards for hardened concrete CSN EN 12390-1. After all the tests it can be concluded that the addition of even small amount of carbon fibers to a regular cement composite has positive influence on the improvement of electrical conductivity, the tensile strength.

Key words: cement-based composite, carbon fibers, conductive fillers, electrical conductivity, heat capacity, smart constructions

Obsah

Seznam použitých zkratk a cizích výrazů	9
Úvod	10
TEORETICKÁ ČÁST	11
1. Kompozitní materiály	11
1.1 Definice kompozitních materiálů	11
1.2 Izotropie a anizotropie	11
1.3 Synergický účinek	12
1.4 Rozdělení kompozitních materiálů	12
1.4.1 Podle velikosti částí výztuže	12
1.4.2 Podle disperzní fáze	12
1.4.3 Kompozity podle typu matrice	13
1.5 Matrice	13
2. Cementový kompozit	14
2.1 Složky cementového kompozitu	14
2.2 Vlastnosti cementového kompozitu	20
2.2.1 Základní vlastnosti – objemová hmotnost, pórovitost, modul pružnosti .	20
2.2.2 Mechanické vlastnosti – pevnost	22
2.2.3 Tepelně – fyzikální vlastnosti	24
2.2.4 Elektrické vlastnosti	25
2.3 Cementový kompozit s přidanou vodivou fází	27
2.3.1 Typy chytrých betonů	28
2.3.2 Druhy vodivých fází	29
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
3. Cementový kompozit s přidanými uhlíkovými vlákny	34
3.1 Složení směsí	34
3.2 Homogenizace uhlíkových vláken	36
3.3 Příprava směsí	39
3.4 Výroba vzorků	41
3.5 Experimentální výsledky	41
3.5.1 Objemová hmotnost	41
3.5.2 Dynamický modul pružnosti	42

3.5.3	Pevnost v tahu za ohybu	43
3.5.4	Pevnosti v tlaku	44
3.5.5	Měrná elektrická vodivost	45
3.5.6	Tepelné vlastnosti	46
4.	Diskuze	48
5.	Závěr	50
	Seznam použité literatury a zdrojů	51
	Seznam použitých tabulek	55
	Seznam použitých obrázků	56

Seznam použitých zkratek a cizích výrazů:

CB – Carbon black (Uhlíkové saze)

CF – Carbon fibers (Uhlíková vlákna)

CFP – Carbon fiber powder (Prášek z rozemletých uhlíkových vláken)

CNF – Carbon nanofibers (Uhlíková nanovlákna)

CNT – Carbon nanotubes (Uhlíkové nanotrubičky)

De-icing concrete – Beton se schopností samoohřevu používaný u rozmrazování vrchní vrstvy

GP – Graphite powder (Grafitový prášek)

HPC – Hight-performance concrete (Vysokohodnotný beton)

HSC – Hight-strenght concrete (Vysokopevnostní beton)

Magnetic-shielding concrete – Beton se schopností elektromagnetického stínění

MWCNT – Multi-walled carbon nanotubes

NP – Nickel powder (Niklový prášek)

SWCNT – Single-walled carbon nanotubes

Self-heating concrete – Beton se schopností samoohřevu

Self-sensing concrete – Beton se schopností detekce stupně degradace

SF – Steel fibers (ocelová vlákna)

UHPC – Ultra-hight performance concrete (Ultravysokohodnotný beton)

Úvod

Motivace

V současné době se intenzivně navrhují a zkoumají vlastnosti takzvaných „chytrých“/„smart“ kompozitů. Jde převážně o materiály na bázi cementu, u kterých jsou pomocí vhodných elektricky vodivých příměsí upraveny elektrické vlastnosti tak, že umožňují aplikaci výsledných kompozitů v sofistikovaných řešeních, jako jsou systémy pro počítání počtu průjezdů automobilů na silnicích, systémy pro stínění elektromagnetických vln, kompozity, které jsou schopné detekovat míru porušení vlastní vnitřní struktury nebo systémy, které jsou schopné generovat teplo např. pro účely ohřívání nebo odmrazování povrchu. Tyto materiály kromě dobrých mechanických vlastností vykazují i zvýšenou elektrickou vodivost, které je dosaženo přidáním vhodného množství elektricky vodivé příměsí/vodivých příměsí. Hlavní motivací bakalářské práce je zlepšení elektrické vodivosti referenční cementové malty pomocí přídavku uhlíkových vláken tak, aby bylo možné výsledný produkt považovat za „chytrý materiál“ dále využitelný v praktických aplikacích.

Cíl práce

Práce si klade za cíl návrh a přípravu elektricky nevodivé cementové malty (referenční materiál) a cementových malt s přídavkem uhlíkových vláken v hmotnostním zastoupení 1%, 2%, 3%, 3,5%. U jednotlivých směsí budou sledovány základní, tepelné, mechanické a elektrické vlastnosti. Na základě výsledků bude provedena diskuze nad změnou sledovaných vlastností v závislosti na množství přidaných uhlíkových vláken a bude zhodnoceno zlepšení elektrických vlastností v závislosti i na množství přidané elektricky vodivé fáze.

Rozsah práce

V rámci bakalářské práce byla provedena analýza současného stavu testování cementových kompozitů se zlepšenými elektrickými vlastnostmi (state of the art), připraveny vzorky pro stanovení základních vlastností materiálů – (objemová hmotnost), tepelných vlastností materiálu – (součinitel tepelné vodivosti, objemová/měrná tepelná kapacita, součinitel teplotní vodivosti) – mechanické vlastnosti – (pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku) a elektrické vlastnosti – (měrná elektrická vodivost).

TEORETICKÁ ČÁST

1. Kompozitní materiály

Jedna z definic kompozitního materiálu zní: „*Jakýkoli materiál, který není čistá látka a obsahuje více než jednu složku, může být teoreticky klasifikován jako kompozitní materiál*“ (Javitz, A. E.: Design. 1965, s 64).

1.1 Definice kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou kombinací minimálně dvou nebo více materiálů (např. vyztužovací prvky, výplně a spojovací matrice) rozdílných pouze v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou totožnost (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Většina uspořádání je taková, že vyvolává jejich anizotropii. Materiál považujeme za anizotropní, pokud jeho mechanické vlastnosti v různých směrech jsou odlišné. V kompozitu je dosahováno tak dobrých vlastností, kterých by nebylo možno dosáhnout pouhou sumací jednotlivých materiálů – synergický účinek. ^[1]

1.2 Izotropie a anizotropie

U vláknitých kompozitů s uspořádanými vlákny (uhlíkovými, skleněnými) se jejich pevnost (tuhost) velmi liší, dokonce o několik řádů. Proto je potřeba anizotropií u kompozitů vždy brát v potaz.

Základní rozdělení:

Izotropní materiál: jde o materiál, u kterého nezávisí na směru působení síly, protože má ve všech směrech stejné mechanické vlastnosti.

Anizotropní materiál: vlastnosti takového materiálu značně ovlivňuje směr vláken umístěných v kompozitu. Má jiné mechanické vlastnosti po směru vláken a jiné kolmo na ně. ^[1]

1.3 Synergický účinek

Jde o efekt, kdy v kompozitu dochází ke kombinaci kladných vlastností jeho složek tak, že celek přesahuje pouhou sumaci vlastností složek. U kompozitů je výhodné, aby byl tento účinek co nejefektivnější. Především potom v těch vlastnostech, na které se kladou vyšší nároky. ^[1]

1.4 Rozdělení kompozitních materiálů

1.4.1 Podle velikosti částic výztuže

Druhy jednotlivých částí výztuže jsou znázorněny na Obr. 1:

- Nanokompozitní materiály – rozměry výztuže mají v jednotkách nanometrů, jsou používány především ve zdravotnictví a výpočetní technice
- Mikrokompozitní – největší příčné rozměry se pohybují v rozmezí 100-102 μm , využití je především v průmyslu
- Makrokompozitní – mají výztuž o rozměrech příčného rozměru 100-102 nm, takové výztuže jsou používány ve stavebnictví. ^[1]

1.4.2 Podle disperzní fáze

Kompozity musí obsahovat alespoň jednu složku, která je v celém rozsahu spojitá a určuje tak tvar a rozměry. Tato složka je označována jako matrice. Ostatní složky jsou v matici rozptýleny (dispergovány). Podle disperzní fáze se kompozity dělí na 3 základní typy:

Kompozit prvního typu: jde o typ kompozitu, který obsahuje disperzní látku (jednu nebo více) z pevné fáze. Používaný je především v technice.

Kompozit druhého typu: má kapalnou disperzi. Tento typ je méně často používaný, patří do něho pórovité struktury s póry vyplněnými např. olejem. Kapalina může být v otevřených nebo uzavřených pórech.

Kompozit třetího typu: má plynnou disperzi. Patří sem především pěnové materiály a různé vláknové struktury. ^[2]

1.4.3 Kompozity podle typu matrice

- Vlákenná (polymerní) matrice
- Kovová matrice
- Keramická matrice
- Skleněná nebo sklokeramická matrice
- Uhlíková matrice ^[2]

1.5 Matrice

Jde o pojivo výztuže v polymerních kompozitech. Úkol matrice je chránit výztuž před působením vnějších vlivů. Vlákna musí být v kompozitu uchycena tak, aby mohla odvádět zatížení, které bude působit na konstrukci. Tažnost matrice je vyžadována vyšší, ale vlákna musí mít větší pevnost.

Parametry ovlivňující vlastnosti kompozitů:

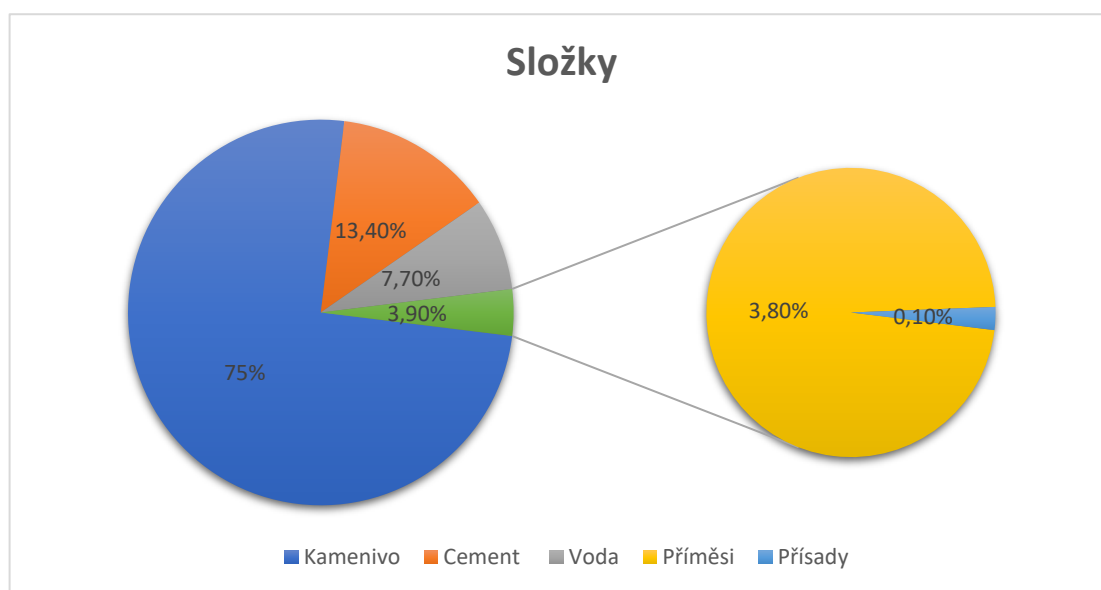
- Vlastnosti fází, tj. mechanické, tepelné, elektrické vlastnosti a jejich poměr (pevnost, moduly pružnosti, Poissonův součinitel, pracovní diagram, mezní přetvoření) a izotropie, anizotropie a ortotropie, což je vlastnost, kterou se označuje závislost určité veličiny na volbě směru. Vlastnosti jsou v různých směrech různé.
- Objemové zastoupení fází, jejich geometrický tvar a jejich geometrické uspořádání v systému včetně pórů, tj. třeba množství, orientace a průměrné vzdálenosti dispergované fáze.
- Interakce neboli vzájemné působení jednotlivých fází a vlastnosti styku, tedy schopnost přenosu zatížení z matrice do vyztužujících částic.
- Historie materiálu i fází od jejich vzniku, která zahrnuje především časové faktory, technologii výroby apod. ^[3]



Obr. 1: Dělení kompozitních materiálů podle tvaru a uspořádání výztuže. ^[4]

2. Cementový kompozit

Cementový kompozit je stavební materiál, který se skládá z cementu, kameniva, vody, příměsí a přísad (viz. Obr. 2). Dle druhu kameniva (jemné, hrubé) rozlišujeme několik základních cementových kompozitů: cementovou pastu, cementovou maltu a beton. Smícháním cementu s vodou se nastartuje chemická reakce - hydratace. U hydratace je důležitým faktorem teplota, která musí být vyšší než 5°C. Když této teploty není dosaženo, dochází k zastavení hydratace a tím pádem i tuhnutí a tvrdnutí. V těchto případech nám pomáhají příměsí a přísady, které mají na hydrataci zásadní vliv. K tuhnutí u běžného cementového kompozitu bez použitých přísad nebo příměsí dochází již po několika hodinách. Tvrdnutí je dlouhodobý proces, ale značný nárůst pevnosti je viditelný po 28 dnech. Proto se po této době provádí zkoušky mechanických vlastností. [5]



Obr. 2: Poměr směsí zastoupené v cementovém kompozitu. [35]

2.1 Složky cementového kompozitu

Pojivo – Cement

Cement je hydraulické pojivo. Jedná se o jemně mletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která v důsledku chemické hydraulické reakce tuhne a tvrdne. Cement se vyrábí společným vypalováním vápence a jílu při teplotách okolo 1450 °C. Vyrobený slínek se pak rozemílá, někdy i s příměsemi (vysokopeční struskou, trasem, popílkem). Vzniklý šedivý prášek – cement – smíchaný s vodou vytváří

pojivovou (hydraulickou) složku betonu, která tvrdne na vzduchu i pod vodou. Během probíhajících chemických pochodů vznikají jemné krystaly s různým chemickým složením, vzájemně prorůstající a mající vliv na pevnost. Vzniklý „cementový kámen“ si zachovává pevnost a objemovou stálost. [6]

Množství a typ cementu (viz. Tab. 1) ovlivňuje pevnost, vodotěsnost, přídržnost a zlepšuje odolnost výztuže proti korozi, i modul pružnosti, ovšem za cenu zvýšení smrštění (možnost trhlinek) a vývoje zvýšeného hydratačního tepla. [6]

TYP CEMENTU	SLOŽENÍ
CEM I	Portlandský cement
CEM II	Portlandský cement směsný
CEM III	Vysokopecní cement
CEM IV	Pucolánový cement
CEM V	Směsný cement

Tab. 1: Rozdělení cementů dle ČSN EN 197-1. [6]

CEM I – Nejpoužívanějším cementem je Portlandský cement s označením CEM I. Vyrábí se pouze jeden typ, který obsahuje nejméně 95% slínku. Výhodou cementu CEM I je poměrně rychlý nástup počáteční pevnosti. Této vlastnosti se hojně využívá u konstrukcí, které je třeba rychle odbedňovat. Rychlý hydratační proces zapříčiňuje nárůst hydratačního tepla, což je výhodou při betonování při nízkých teplotách (5°C). [7]

CEM II – Jedná se o soubor cementů, které se liší podle typu přísad (Tab. 2). Ty ovlivňují velké množství vlastností, které cement vykazuje při tvrdnutí, smršťování a konečné pevnosti. [7]

Název cementu	Slínek (K)	Vysokopecní struska (S)	Křemičitý úlet (D)	Pucolán přírodní (P)	Pucolán průmyslový (Q)	Popílek křemičitý (V)	Popílek vápenatý (W)	Kalcinovaná břidlice (T)	Vápencec (L)
Por. struskový cement	65-94	6-35	~	~	~	~	~	~	~
Por. cement s křemičtým úletem	90-94	~	6-10	~	~	~	~	~	~
Por. pucolánový cement	65-94	~	~	6-35	6-35	~	~	~	~
Por. popílkový cement	65-94	~	~	~	~	6-35	6-35	~	~
Por. cement s kalcinovanou břidlicí	65-94	~	~	~	~	~	~	6-35	~
Por. cement s vápencem	65-94	~	~	~	~	~	~	~	6-35
Por. směsný cement	65-94	6-35							
	35-64	36-65	~	~	~	~	~	~	~

Příměsi jsou zadávány v % hmotnosti

Tab. 2: Příměsi v cementu CEM II. [7]

CEM III – Jde o cement, který obsahuje vysoké množství vysokopecní strusky. Poměr příměsí je 5-34% slínku a 66-95% vysokopecnostní strusky. Je vyznačován pomalým nárůstem pevnosti, nízkým vývinem hydratačního tepla a vykazuje vysokou odolnost proti agresivnímu prostředí a vysokým teplotám. Je ideální pro betonáž masivních konstrukcí v horkém létě, pevnostně dosahuje jen nižších tříd. [7]

CEM IV – Pucolánový cement je vyznačován pomalým nárůstem počáteční pevnosti. Skládá se z 45-89% slínku, 11-65% křemičitého úletu, přírodního a průmyslového pucolánu a křemičitého popílku. Je vhodný pro mokré prostředí, dobře odolává i slané mořské vodě. [7]

CEM V – Směsný cement dosahuje nejnižších pevností. Proto se hodí se na nenáročné podlahy a potěry. Je složený z 20-64% slínku, 18-50% vysokopecní strusky, 18-50% křemičitého popílku, průmyslového a přírodního pucolánu. [7]

Pevnostní třídy cementu klasického (N) a rychle tuhajícího (R)

Cement dělíme dle ČSN EN 196-1 podle dosahovaných pevností v daných časových intervalech od počátku hydratačního procesu do pevnostních tříd uvedených v tabulce 3.

Tab. 3: Minimální tlakové pevnosti cementů typu R a N. [7]

Plnivo – Kamenivo

Kamenivo je zpravidla chemicky neaktivní zrnitý materiál. V cementovém kompozitu se vyskytuje z důvodu nižší ceny v porovnání s cementem a díky zastoupení v množství 65-75% celkového objemu betonu zajišťuje lepší objemovou stabilitu, trvanlivost a má velký vliv na pevnost, a to zejména u vysokohodnotného betonu. Na kamenivo se klade důraz v několika ohledech. Nesmí obsahovat problematické množství chemických látek. Jde např. o *chloridy* (max. 0,5%), které způsobují korozi výztuže, nebo *sírany* (max. 2%), které způsobují popraskání betonu z důvodu objemových změn způsobených ettringitem. Ani působení mrazu se nesmí v kamenivu zanedbávat. Beton, který je vystaven střídavému rozmrazování a zmrazování musí obsahovat kamenivo odolné proti mrazu. To platí i pro betony, u nichž byly použity provzdušňovací přísady. ^[8]

Základní zkoušky vlastností zrnitých materiálů:

- **Zrnitost:** je rozdělení velikosti zrn dle normy ČSN EN 12620 kameniva do betonu. Naším cílem je vytvoření kostry kameniva, ve které jsou mezery mezi různými frakcemi kameniva minimální. To se zajistí tím, že se volí drobné frakce, které se dostanou do mezer mezi hrubší frakci. Zrnitost kameniva se stanovuje pomocí síťového rozboru. Jedná se o sadu normových sít s definovanými velikostmi ok: jemné kamenivo do 4 mm, hrubé do 63 mm. Počítá se procentuální propad a zůstatek na jednotlivých sítích. Z naměřených údajů se zhotoví křivka zrnitosti, která by se neměla příliš lišit od ideální křivky zrnitosti – jedná se o normově definovanou křivku, která vyznačuje ideální smíchání drobného a hrubého kameniva. Drobné kamenivo reprezentuje 0-4 mm, hrubé kamenivo 5-16 mm, drti 20-32 mm a lomový kámen 63-125 mm. ^[8]
- **Vlhkost:** je jedním z nejdůležitějších faktorů, které se u kameniva zjišťují. Má velký vliv na celkovou kvalitu betonu. Týká se to především pevnosti, pórovitosti, trvanlivosti a také zpracovatelnosti. Má zásadní vliv na celkový vodní součinitel (w/c) a jeho změna také ovlivňuje výslednou tlakovou pevnost. ^[8]
- **Nasákavost:** je množství vody, které je schopné kamenivo pojmout otevřenými póry a kapilárami za určitou dobu (standardně 24hod). Stanovení objemové hmotnosti nasáklého kameniva se určuje pyknometrickou metodou nebo vážením na hydrostatických vahách. ^[8]

- **Objemová hmotnost:** je hmotnost jednotkového objemu kameniva. Dělí se na: *Pórovité kamenivo* <2000 kg m⁻³, *hutné kamenivo* 2000-3000 kg m⁻³ a *těžké kamenivo* >3000 kg m⁻³ [9]
- **Pórovitost:** udává procentuální podíl pórů v zrnech kameniva a je dán vztahem
$$P = 100 \cdot \left(\frac{1 - \rho v}{\rho_{mat}} \right) [\%]$$

 ρv = objemová hmotnost [kg m⁻³]
 ρ_{mat} = hustota matrice [kg m⁻³]. [9]
- **Pevnost stlačení ve válci:** stanovuje se jako tlaková pevnost vlastní hmoty kameniva (např. výřezem zkušební krychle matečné horniny). Pevnost kameniva je mnohonásobně větší než samotná pevnost betonu. Minimální požadovaná pevnost kameniva v betonu je 40-100 MPa. [9]

Voda

Voda je jednou ze tří nejdůležitějších složek betonu (společně s cementem a kamenivem). Po smíchání vody a cementu dochází k hydrataci, která má za následek tuhnutí a tvrdnutí. Musí se dbát na správné množství vody v poměru k cementu (w/c). Velké množství vody má za následek snížení kvality betonu z hlediska pevnosti a trvanlivosti. Množství vody a tím i konzistence se zjišťuje např. zkouškou sednutí kužele – zkouška spočívá v měření poklesu výšky (sednutí) betonového vzorku, který byl původně naplněn do formy tvaru Abramsova kužele (viz. Tab. 4). [8]

Velké množství vody = vysoký vodní součinitel w/c zvyšuje pórovitost a tím zhoršuje mechanické vlastnosti. Dochází k větším objemovým změnám a většímu dotvarování, což může mít za následek tvorbu mikrotrhlin. [8]

Třída konzistence	Sednutí [mm]	Zažité označení
S1	10–40	Tuhá
S2	50–90	Plastická
S3	100–150	Měkká
S4	160–210	Velmi měkká
S5	> 210	Tekutá

Tab. 4: Stupně konzistence a sednutí kužele. [8]

Přísady

Tato složka je do směsi přidávána ihned při výrobě nebo v jeho průběhu. Přísady jsou používány především pro snížení nákladů na konstrukce, pro změny ztvrdlého betonu, pro zvýšení kvality, lepšímu ukládání a zpracování. Účinnost přísad závisí na druhu a množství cementu, obsahu vody, teplotě okolního prostředí. Chemické přísady do betonů a malt se dělí do několika skupin dle ČSN EN 934-1. ^[10]

Provzdušňovače: používají se především u konstrukcí vystavovaných účinkům mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám (silniční a mostní konstrukce). Jsou to látky vytvářející v čerstvém cementovém kompozitu velké množství uzavřených vzduchových pórů. Vytvořené vzduchové póry jsou možným prostorem pro zvětšující se objem krystalků ledu. Velikost takto vytvořených pórů se pohybuje od 0,05 mm do 0,3 mm. Jako provzdušňující přísady se používají např. mýdla přirozených pryskyřic. ^[11]

Plastifikátory: jsou přísady, zlepšující zpracovatelnost cementového kompozitu a snižující požadované množství vody (5-10%). To má za následek zvýšení pevnosti ztvrdlého betonu. Klesá riziko vzniku smršťovacích trhlin a snížení objemových změn. Jde např. o polykarboxyláty, hydrolyzáty bílkovin. ^[11]

Zpomalovače tuhnutí: jde o složky oddalující dobu tuhnutí, tím udržují kompozit delší dobu ve zpracovatelné formě. Důvodem pro používání těchto přísad je nepřízeň počasí, kdy při vysokých teplotách dochází ke zvýšené rychlosti tuhnutí. Většina zpomalovačů má také plastifikační a provzdušňovací vlastnosti. Jde např. o fosforečnany, oxikyseliny, sacharidy. ^[11]

Urychlovače tuhnutí: mají opačný vliv na tuhnutí kompozitu. Vyžaduje se u nich rychlý nárůst počáteční pevnosti a používá se především při betonování za nízkých teplot. Jde např. o uhličitan sodný a draselný, hlinitany a křemičitany. ^[11]

Příměsi

Většinou jsou to práškovité látky přidávané do čerstvého betonu pro zlepšení některých vlastností. Dělí se dle normy EN 206 na dva základní typy:

Interní příměsi: nezúčastňují se hydratace betonu a nejčastěji se jedná o jemně mleté kamenivo (filler) nebo pigmenty.

Latentně hydraulické látky: mají skrytou schopnost účastnit se hydratačního procesu tak, že při reakci s Ca(OH)_2 tvrdnou ve vodním prostředí. To se ukáže po přidání aktivátoru (cementu). Latentně hydraulické látky jsou např. popílek, křemičité úlety. ^[9]

2.2 Vlastnosti cementového kompozitu

2.2.1 Základní vlastnosti – objemová hmotnost, pórovitost, modul pružnosti

Objemová hmotnost

Bavíme-li se o běžném prostém betonu, objemová hmotnost se pohybuje od 2000 do 2600 kg/m³. Tyto hranice se rozšiřují podle použití různých druhů kameniva nebo zpevňujících přísad do intervalu 400 kg m⁻³ až do 6000 kg m⁻³. Lehké betony se používají do konstrukcí, kde je vyžadováno snížení hmotnosti. Snížení hmotnosti se docílí například použitím lehčeného kameniva (polystyrenové granule) což má za následek zlepšení tepelně izolačních vlastností. Těžké betony se používají jako stínící konstrukce před nebezpečným zářením (radiace, výzkumné laboratoře). Dle normy ČSN EN 206-1 se betony dělí podle objemové hmotnosti na:

- Lehký beton: $\rho < 2000 \text{ kg m}^{-3}$
- Obyčejný beton: $\rho 2000\text{-}2600 \text{ kg m}^{-3}$
- Těžký beton: $\rho > 2600 \text{ kg m}^{-3}$ ^[12]

Pórovitost

Beton je pórovitý materiál. Množství pórů výrazně ovlivňuje vlastnosti daného kompozitu jako je pevnost, modul pružnosti a trvanlivost. Póry obsažené v betonu dělíme do několika skupin:

- 1) Póry vyskytující se u nedokonale zhutněných betonových směsí, kde následně dojde k nekvalitnímu vypuzení zachyceného vzduchu z betonu, které vytvoří makrodutiny (kaverny).
- 2) Póry obsažené v použitém druhu kameniva. Týká se to např. lehčeného kameniva, díky kterému se zvyšují tepelně izolační vlastnosti, ale zapříčiní pokles pevnosti.
- 3) Sféricky uzavřené póry (bubliny) o velikost 0,05-0,3 mm vytvořené provzdušňovacími přísadami. Tyto póry jsou žádoucí z důvodu zlepšení mrazuvzdornosti kompozitu.
- 4) Póry vznikající mezi zrny hydratujícího cementu. Obvyklá velikost je 0,1-10 μm podle vodního součinitele
- 5) Gelové póry o velikosti 1-10 nanometrů. Stanovují se pomocí adsorpce plynů dusíku, hélia nebo vodní páry. ^[8]

Modul pružnosti

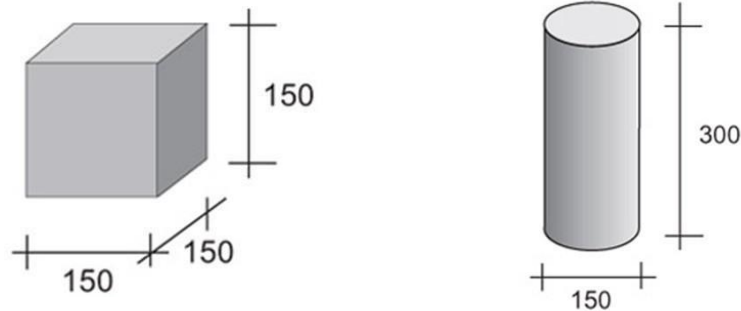
Tato vlastnost betonu je používána pro výpočet deformací (smrštění, dotvarování, průhyby). Mladý beton má menší modul pružnosti než beton vyzrálý. Modul pružnosti je důležité stanovit u konstrukcí citlivých na přetvoření. Měření se dělá dle normy ČSN EN 12504-4 a ČSN 73 1371. Moduly pružnosti se dělí na statický a dynamický. Norma ČSN 73 2011 říká, že mezi statickým a dynamickým modulem je vždy nějaký rozdíl, který se se zvyšováním pevnostní třídy betonu zmenšuje. ^[13]

Dynamický modul pružnosti: pro stanovení dynamického modulu pružnosti jsou používány metody rezonanční a ultrazvuková dle normy ČSN 73 1371, ČSN EN 12504-4 a ČSN 73 1372. Hodnoty dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu vypočteme pomocí naměřené hodnoty rychlosti šíření ultrazvukových impulsů. ^[13]

Statický modul pružnosti: modul pružnosti v tlaku se podle ČSN ISO 6784 zjišťuje z deformací, které nastávají při známém zatížení. ^[13]

2.2.2 Mechanické vlastnosti – Pevnost

V tlaku – Prostý beton se vyznačuje vysokou pevností v tlaku, ale nízkou pevností v tahu. Pro zlepšení tohoto nedostatku se do prostého betonu přidává ocelová výztuž a vzniká tak vyztužený beton. Pevnost betonu v tlaku je měřena na normových vzorcích tvaru krychle o rozměrech 150x150x150 mm (krychelná pevnost) nebo válcích o rozměrech 150x300 mm (válcová pevnost) Obr. 3. [8]



Obr. 3: Vzorky pro krychelnou a válcovou zkoušku v tlaku. [14]

Rozdělení betonů dle ČSN EN 206-1:

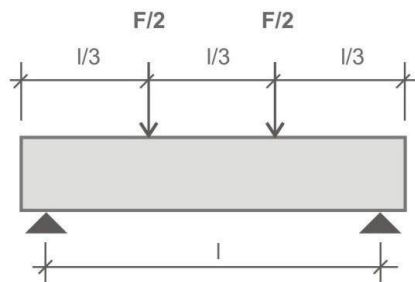
Obyčejný beton: jedná se o klasický prostý beton s pevnostními třídami od C8/10 až do C50/60. Pevnost v tlaku se pohybuje od 8 MPa do 60 MPa a pevnost v tahu za ohybu je 1/6 až 1/10 pevnosti v tlaku. [15]

Vysokohodnotný beton (HPC), vysokopevnostní beton (HSC): jde o betony pevnostních tříd C55/67 až C90/105 mimořádné kvality. Hodnota vodního součinitele pro HPC a HSC se pohybuje v rozmezí 0,35-0,4. Jednou z podmínek pro tyto druhy betonů je nárůst pevnosti v tlaku minimálně 17,5 MPa za 4 hodiny, 35 MPa za 24 hodin a 70 MPa za 28 dní (stačí splnění jedné z uvedených hodnot). Další podmínkou trvanlivost betonu daná součinitelem trvanlivosti po tří stech rozmrazovacích cyklech s hodnotou větší než 0,8. Třetí podmínka je velikost vodopojivostního součinitele (m_{vody} / m_c hmotnost všech složek plnicí funkci plniva) pod 0,35. Výhodou těchto betonů je vyšší odolnost proti působení CHRL, vyšší odolnost proti obrušování. Mezi nevýhody HSC patří vyšší křehkost. [15]

Ultravysokohodnotný beton (UHPC): beton mimořádné kvality a vysokých pevností v tlaku. Pevnostní třídy jsou C135/150 tedy pevnosti v tlaku větší než 150 MPa a v tahu

větší než 15 MPa. Hodnota vodního součinitele ultravysokohodnotného betonu v rozmezí 0,15-0,3. [15]

V tahu – Zkouška pevnosti v tahu za ohybu se provádí na betonových trámcích o rozměrech 40x40x160 mm. Minimální počet zkoušených vzorků jsou 3 trámečky (stejně tak u měření pevnosti v tlaku). Podle uložení trámečků se jedná o tříbodový nebo čtyřbodový ohyb (Obr. 4). Výsledkem těchto měření jsou charakteristické hodnoty, které jsou poté přepočítávány do hodnot návrhových. [16]



Obr. 4: Zkouška pevnosti ve čtyřbodovém tahu za ohybu. [16]

Rozdělení betonů dle ČSN EN 12390-5:

Prostý beton: pevnost v tahu ohybu u běžného betonu je skoro desetinná oproti pevnosti v tlaku. Pohybuje se v rozmezí od 0,8 MPa (C8/10) do 6 MPa (C55/60). [16]

Beton s přidanou prutovou výztuží: ocelové pruty se záměrně přidávají do betonu z důvodů vysoké pevnosti oceli v tahu. Zvýšení únosnosti je dáno množstvím přidané výztuže a průměrem prutů. Pevnost je dána pevností v tahu oceli. Po vzniku prvních mikrotrhlin v betonu se aktivuje výztuž a přebírá tahové zatížení. [16]

Beton s přidanými drátky: i drátky jsou do betonu přidávány za účelem zvýšení pevnosti betonu v tahu. Materiálem jsou většinou ocelová vlákna, uhlíková vlákna. Pevnost je v takovém případě zlepšena přibližně dvojnásobně (8 – 10 MPa). [16]

Charakteristická pevnost: (f_{ck}) je taková hodnota, která při zkoušce měření pevnosti v tlaku s pravděpodobností 95% bude překročena. Znamená to, že tato hodnota je spolehlivější a volí se proto, že beton, jakožto nehomogenní materiál, se vyrábí na betonárnách při různých podmínkách okolí a z různě proměnných surovin, které mají vliv na výslednou pevnost. [8]

Návrhová pevnost: (f_{cd}) tato hodnota je používána pro navrhování konstrukcí která se přiklání na stranu bezpečnosti, proto je charakteristická hodnota zmenšena 1,5x. [8]

2.2.3 Tepelně – fyzikální vlastnosti

Ve stavebních konstrukcích a v materiálech obecně dochází k přenosu tepla:

- Vedením v látkách (Kondukce)
- Prouděním látek (Konvekce)
- Zářením (Radiace)

Přenos tepla vedením, které může probíhat v látkách pevných, plynných i kapalných, dochází předáváním kinetické energie neuspořádaných tepelných pohybů jednotlivých stavebních částic ve spojitém látkovém prostředí. Nejlepší tepelnou vodivost tímto způsobem mají především kovy. Kapaliny a plyny na tom nejsou tak dobře, plyn je dokonce v tomto případě považován za dobrý tepelný izolant. ^[17]

Přenos tepla prouděním, stejně jako u přenosu vedením, dochází ve spojitém látkovém prostředí. Dochází k němu však pouze v kapalinách a plynech. Samovolné proudění je způsobeno tím, že se zahříváním v důsledku roztažnosti zmenšuje hustota látek. Pokud vznikne mezi místem ohřevu a místem ochlazení v tekutině teplotní rozdíl, ohřívána část tekutiny stoupá při vytlačování ochlazené těžší části. Přenos tepla prouděním v kapalinách a plynech převyšuje přenos tepla vedením. ^[17]

Přenos tepla zářením nepotřebuje spojitě látkové prostředí. Tento druh tepla je přenášen elektromagnetickým zářením. Pokud je tento přenos zprostředkován hlavně infračerveným zářením, jedná se o přenos sáláním. ^[17]

Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]: Jde o charakterizující proces vedení tepla, které vyjadřuje schopnost látky vést teplo a je vyjádřen číselnou hodnotou jako hustota tepelného toku při gradientu teploty 1 K m^{-1} v látce a lze ho měřit stacionární či nestacionární metodou. Součinitel tepelné vodivosti není pro žádný materiál stálou hodnotou, neboť závisí na struktuře látky, pórovitosti, teplotě, tlaku a vlhkosti. Nejlepším materiálem pro tepelnou vodivost jsou kovy, např. stříbro má $428 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, mezi kapalnými látkami má voda $0,6062 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ a nejhůře vedou plyny, kde se suchý vzduch dá považovat za tepelný izolant $0,0258 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. ^[17]

Součinitel teplotní vodivosti a [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]: Jde o schopnost stejnorodého materiálu o známé vlhkosti vyrovnávat teploty při neustáleném vedení tepla. Je znázorněn vztahem

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}. \text{ Kde } \lambda \text{ je součinitel tepelné vodivosti } [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}], c_p \text{ je objemová tepelná}$$

kapacita [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$] a ρ je objemová hmotnost měřeného materiálu. Podle hodnoty součinitele teplotní vodivosti lze soudit z rychlosti změny teploty v daném místě materiálu změny jeho povrchové teploty. Když je hodnota teplotní vodivosti materiálu vyšší, tím je teplota v daném místě materiálu závislejší na změně jeho povrchové teploty.

[18]

Měrná tepelná kapacita c [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]: Tato fyzikální veličina ukazuje, jaké množství tepla je potřeba dodat látce o známé hmotnosti, abychom ji ohřáli o 1°C (1 K).

Je znázorněna vztahem $c = \frac{C_p}{\rho v}$. Kde C_p je objemová tepelná kapacita naměřená

přístrojem [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$], ρv je objemová hmotnost měřeného materiálu. Voda má měrnou tepelnou kapacitu $4180 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ a např. led má $2090 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$. Z toho vyplývá, že pro ohřátí vody o 1°C potřebujeme dvojnásobné množství energie než na ohřátí ledu. Proto je voda vhodná jako kapalina do chladičů. Kovy jsou všeobecně známy jako materiál s nízkou tepelnou kapacitou. [19]

2.2.4 Elektrické vlastnosti

Cementové kompozity ve vysušeném stavu neobsahují žádné volné nosiče elektrického náboje. Jejich měrný elektrický odpor ρ [$\Omega \text{ m}$] se v plně vysušeném stavu pohybuje kolem $10^9 \Omega \text{ m}$, díky čemuž se řadí mezi velmi dobré izolanty. Rostoucí vlhkost cementových kompozitů má za následek snížení měrného elektrického odporu. To je způsobeno ionty solí obsažených v pórovém roztoku. K výraznému snížení měrného elektrického odporu dochází po přidání dostatečného množství elektricky vodivých příměsí, které vytváří vodivé cesty. Dominantním nosičem náboje je v tomto případě elektron. [20]

Elektrické veličiny ovlivněné přidáním vodivé fáze:

Nejčastěji se pro zlepšení vedení elektrického proudu používají materiály, které nesnižují pevnost betonu v tahu. Nejvhodnějšími kandidáty jsou ocelová a uhlíková vlákna (SF, CF). Pokud je vyžadováno snížení odporu bez nutnosti zlepšení mechanických vlastností (např. self-sensing concrete, self-heating concrete, magnetic-shielding concrete), mohou se použít i další vodivé fáze (např. CNTs, CFP, GP,....) [20]

Měrný elektrický odpor (rezistivita) ρ [Ωm] je veličina vyjadřující objemový elektrický odpor (elektrický odpor materiálu o délce 1 m a průřezu 1 m²). Podle velikosti rezistivity se látky dělí do 3 skupin: [21]

Vodiče – Jde o látky, ve kterých se vyskytují nosiče volného náboje. Jedná se především o kovy (tzv. vodiče první třídy), které obsahují vodivostní elektrony. Dalšími vodiči jsou roztoky elektrolytů (tzv. vodiče druhé třídy) obsahující volné ionty a ionizované plyny. Zvláštní skupinou vodičů jsou tzv. supravodiče, které při průchodu elektrického náboje nekladou žádný odpor. [21]

Polovodiče – Jsou pevné látky, které vykazují elektrické vlastnosti mezi izolanty a vodiči v závislosti na vnějších nebo vnitřních podmínkách. Jedná se např. o křemík, germanium (další materiály viz. Tab 5). Částice se při dodávání energie polovodičem jedná o uvolňování elektronů (e⁻) z valenčních orbitalů atomů, které vytváří valenční pás – excitaci. Velikost excitační energie se u polovodičů pohybuje mezi hodnotami vodičů a izolantů. Volné elektrony způsobují elektronovou vodivost. Zároveň s uvolněným elektronem vzniká na jeho původním místě tzv. kladná díra (+). To je místo vykazující kladný elektrický potenciál. Kladné díry se přemísťují díky pohybu elektronů a tím je způsobena tzv. děrová vodivost. Směr pohybu kladných děr je opačný oproti pohybujícím se elektronům. [22]

Izolanty – (nevodiče, izolanty nebo dielektrika) jsou materiály, ve kterých není možný volný pohyb elektrického náboje. V tabulce 5. jsou uvedeny příklady vodičů, polovodičů a izolantů. [23]

Vodiče [$10^{-8} \Omega m$]		Polovodiče [Ωm]		Izolanty [Ωm]	
Rtuť	1,505	Křemík	$3 \cdot 10^{10}$	Jantar	10^{18}
Měď	1,555	GaP	10^{10}	Sklo	$10^{11} - 10^{16}$
Zlato	2,04	C (diamant)	10^6	Plexisklo	10^{13}
Hliník	2,45	Germánium	0,47	PVC	10^{13}
Železo	8,81	InAs	$3 \cdot 10^{-4}$	Bakelit	$10^6 - 10^{12}$

Tab. 5: Rezistivity různých látek. ^[23]

Elektrické veličiny jako elektrický odpor R [Ω], elektrická vodivost G [S], elektrická kapacita C [F], impedance Z [Ω], reaktance X [Ω], admitance [S] a další se používají k popisu chování elektrických součástek, případně k popisu chování kompozitních materiálů při buzení střídavým elektrickým polem. ^[17]

Pro vyjádření elektrických vlastností cementových kompozitů ve stejnosměrném elektrickém poli je vhodný popis pomocí dvou veličin: měrného elektrického odporu ρ [Ωm] a měrné elektrické vodivosti σ [$S m^{-1}$]. Tyto veličiny jsou analogií k elektrickému odporu R , resp. elektrické vodivosti G s tím rozdílem, že berou v úvahu tvarový faktor (plochu a vzdálenost elektrod), de facto tak vyjadřují elektrický odpor a elektrickou vodivost v objemu materiálu. ^[17]

Ačkoliv je popis chování cementových kompozitů ve stejnosměrném elektrickém poli jistým zjednodušením, protože nebere v úvahu částečně kapacitní povahu těchto materiálů a frekvenční závislost, ve výzkumu je velmi často používán. ^[17]

2.3 Cementový kompozit s přidanou vodivou fází

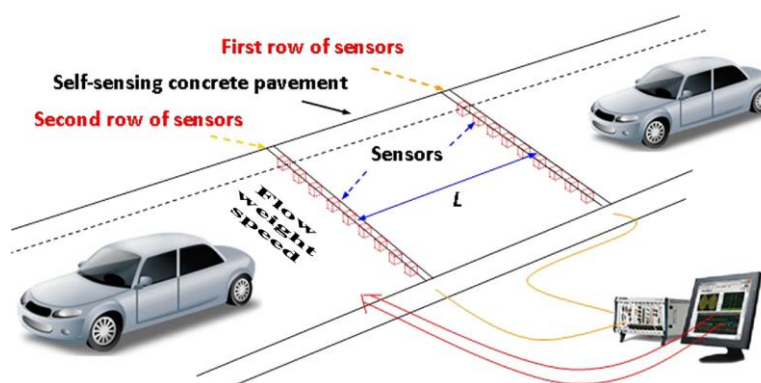
Cementový kompozit se skládá ze stejných přísad jako běžný cementový kompozit. Rozdíl je v přidavku funkčního plniva, od kterého si slibujeme zajištění elektrické vodivosti, které je možné využít např. pro *self-sensing concrete* nebo *self-heating concrete*. Vhodné množství funkčního plniva zajistí dostatečné zlepšení elektrické vodivosti a zároveň žádné nebo minimální snížení ostatních vlastností betonu jako jsou pevnost v tlaku, pevnost v tahu. ^[35]

Možným úskalím kompozitů s funkčním plnivem je obtížné a mnohdy komplikované rovnoměrné rozptýlení částí. Proto je na rozmístění plniva (homogenizace) kladen velký

důraz. Některá plniva (např. CF, CNT, CNF, CFP) jsou dispergována ve vodním prostředí pomocí homogenizátoru. [35]

2.3.1 Typy chytrých betonů

Self-sensing concrete – Přidáním funkčního plniva (CF, CNT, SF,) do běžného cementového kompozitu je vyroben beton se speciálními vlastnostmi. Tento typ betonu při mechanickém namáhání (tah, tlak) mění díky deformacím uvnitř materiálu své elektrické vlastnosti, čímž můžeme detekovat problém. Běžně se testuje dynamické namáhání a sensitivita daných příměsí. Na Obr. 5 je znázorněno využití self-sensing concrete v dopravním snímání. [24]



Obr. 5: Příklad využití Self-sensing concrete pro automobilovou dopravu. [24]

Self-heating concrete – Jedná se o takový cementový kompozit, který za použití elektrického proudu v závislosti na elektrickém odporu vytváří Jouleovo teplo. Klasický cementový kompozit není elektricky vodivý, proto je jeho odpor příliš vysoký pro vznik Jouleova tepla, které je základním předpokladem pro návrh self-heating concrete.

Jouleovo teplo – Dojde-li k průchodu elektrického proudu jakýmkoli materiálem, dojde k zahřívání. V běžném životě se využívá každý den jako vlákno žárovky, rychlovarná konvice, indukční plotýnka. V těchto případech se jedná o Jouleovo teplo, které je žádoucí. Naopak nežádoucí je u motorů, transformátorů a dalších elektrospotřebičů, kde může velké teplo způsobit zničení stroje. [25] Má vynikající potenciál pro domácí i venkovní prostředí. Zejména pro rozmrazování sněhu a vyhřívání garáží, chodníků, příjezdových cest, dálničních mostů a letištních ploch. Jeho použití můžu výrazně eliminovat používání posypové soli, což má kladný dopad především na efektivitu a ekologicky šetrnou alternativu. [24]

Předchozí zkoumání prokázalo, že self-heating concrete s CNT může zvýšit teplotu plochy z 1,1 °C na 15,6 °C za 30 minut s průměrným vstupním výkonem přibližně 520 W/m². [24]

Magnetic-shielding concrete – jedná se o druh betonu stínícího elektromagnetického záření. Konstrukce tohoto typu mají schopnost tzv. Faradayovy klece. To je taková konstrukce, která má schopnost vést elektrický náboj na svém povrchu, nikoli uvnitř vodiče (např. automobil je Faradayova klec). Tedy v takovém případě nepůsobí uvnitř vodiče žádné elektrické pole. Když tedy na povrch takové konstrukce pustíme elektrický náboj, uvnitř nebude působit žádné elektrostatické pole. Faradayova klec se používá na místech, kde chceme ochránit osoby od nebezpečného elektromagnetického záření (např. radiologické stanice v nemocničních zařízeních). [25]

Jedním z důvodů využívání tohoto druhu betonu je i ztlumení telefonního signálu nebo znemožnění používání různých druhů odposlouchávání. Takovými prostory mohou být datová centra, měřicí zařízení nebo ministerstva. [25]

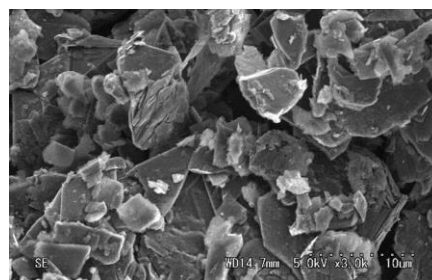
2.3.2 Druhy vodivých fází

Částicové

GP – (graphite powder) grafitový prášek je forma uhlíku s vrstevnatou planární strukturou. V každé vrstvě jsou atomy uhlíku uspořádány v tzv. voštinové mřížce s oddělením 0,142 nm a vzdálenost mezi rovinami je 0,335 nm. Grafit je měkký a je dobrým vodičem tepla a elektřiny. Má vysokou žáruvzdornost a stabilní chemické vlastnosti. Společně s SF nebo CF je vhodný pro použití do self-sensing concrete. V běžném užití je velmi užívanou surovinou pro výrobu tuh do grafitových tužek (Obr. 6 a 7). [24]



Obr. 6: Grafitový prášek GP. [26]

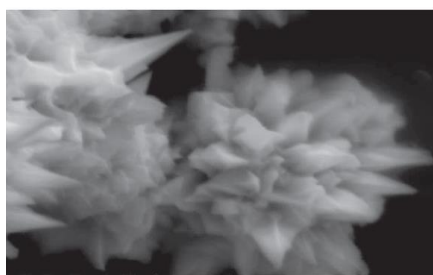


Obr. 7: Grafitový prášek GP pod mikroskopem. [24]

NP – (nickel powder) niklový prášek je tvořený obrusem přechodného kovu niklu, který je velmi tvrdý a tvárný, což z něj činí velmi dobrého uchazeče na místo funkčního plniva do Self-sensing concrete. Výborné výsledky vykazuje u elektrických, tepelných a magnetických vlastností a je velmi dobře odolný proti korozi. Niklový prášek tvoří kulovité částice s ostrými nanošpičkami na jejich povrchu (Obr. 8 a 9).^[24]



Obr. 8: Niklový prášek NP.^[27]



Obr. 9: Niklový prášek NP pod mikroskopem.^[24]

CB – (carbon black) jsou uhlíkové saze tvořeny amorfním uhlíkem, který má vysoký měrný povrch. Saze jsou charakterizovány dle velikosti částic. Průměrná velikost primárních částí komerčních sazí se pohybuje v rozmezí od 10 nm do 400 nm, zatímco u sazových agregátů jde o velikost až od 100 nm do 800 nm. Stanovení velikosti částic se provádí laserovým analyzátozem částic. Výhodou sazí je velmi nízká objemová hmotnost, vysoká chemická a tepelná stabilita, trvalá elektrická vodivost a oproti ostatním funkčním vláknům nízká cena (odpadní materiál).^[24]

Řadí se do různých kategorií podle výrobního procesu:

Kanálové saze se vyrábějí spalováním zemního plynu za přísunu kyslíku k řadě hořáků. Saze jsou usazovány na chladném povrchu, kde jsou odebírány a dopravovány k dalšímu zpracování. Nejprve jsou saze zbaveny gritu (velké spečené kousky) a pak lisovány, aby se zvýšila objemová hmotnost, snížila se tak jejich prašnost a zlepšily se podmínky pro její aplikování.^[28]

Retortové saze se v dnešní době vyrábějí převážně z těžkých aromatických olejů. Hlavním principem je nedokonalá oxidace suroviny, jemně rozprášené do prostoru retorty vyzdžené ohnivzdorným materiálem a rozpálené na 1200 °C–1500 °C. Saze směřují

s proudem spalin do chladících prostorů, kde jsou shlazeny vodou. Studené saze jsou zachyceny v cyklonech. Poté se lisují (ze stejného důvodu jako kanálové saze). Výhodou tohoto postupu je větší množství získaných sazí než u kanálové metody a celkově se retortovou metodou vyrobí 95% všech sazí. [28]

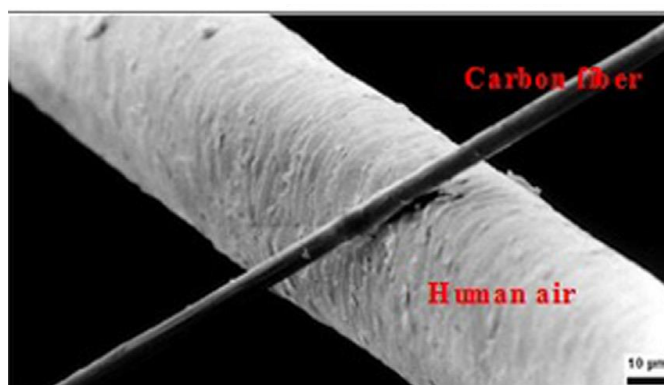
Termické saze se získávají pomocí tepelného rozkladu plynů nebo olejů bez přítomnosti vzduchu. Princip výroby spočívá ve střídavém rozpálení vyzdívkou speciální komory (cca 1200 °C), spalováním suroviny v přebytku vzduchu, a pak se vhání surovina bez vzduchu. Saze jsou vháněny do cyklonu. Po vychladnutí komory se cyklus opakuje. Výsledné saze jsou specifické velkými částicemi a patří k sazím neaktivním. [28]

Lampové saze se vyrábějí nedokonalým spalováním kapalných uhlovodíků získaného hlavně z černouhelného dehtu. Usazování probíhá v cyklonech, usazovacích komorách nebo filtrech. Jde o první metodu výroby sazí a je nejneefektivnější metodou. [28]

Vodivé saze se vyrábějí kontinuálním rozkladem acetyleny v kovových reaktorech vyloženým žáruvzdorným zdivem při teplotách 800 °C–1000 °C. Jedná se o exotermní reakci, proto musí být reaktor neustále chlazen, aby nedošlo k explozi. [28]

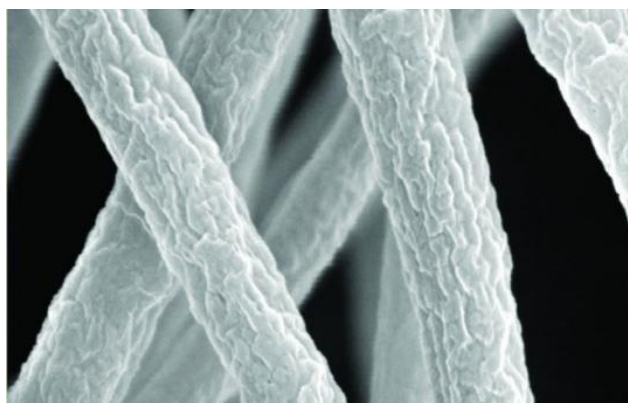
Vláknité

CF – (carbon fiber) uhlíková vlákna jsou vyrobena z uhlíkových krystalů uspořádaných v podélné ose (Obr. 10). Uhlíková vlákna je vhodné přidávat do cementového kompozitu pro jejich velké množství výhod, kterými disponují. Jde především o vysokou pevnost, nízkou měrnou hmotnost, velkou tepelnou odolnost a vysoký modul pružnosti. Uhlíkové vlákno se připravuje v prvním kroku karbonizací primárního vlákna. Musí se dávat pozor, aby nedošlo k přílišnému zahřátí a rozpadu na mikroskopické části vlákna. Je používán proces zvláknování. [29]



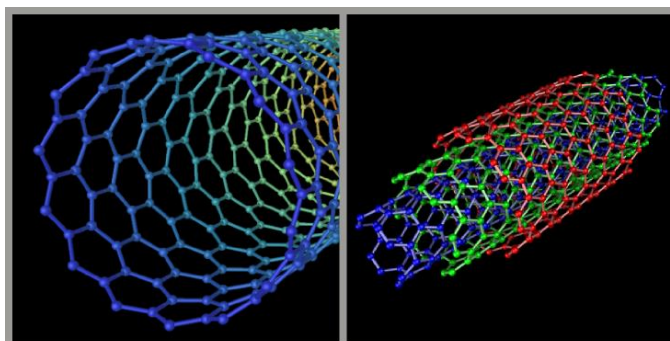
Obr. 10: Porovnání velikosti CF s lidským vlasem. [24]

CNF – (carbon nanofibers) uhlíková vlákna. Jedná se o druh kvazi-jednorozměrných nanočástic uhlíkových vláken. Mohou být rozděleny na duté uhlíky nanovláken a pevné oxidy nanovláken. Průměr je obvykle v rozmezí od 10 do 500 nm a délka do 0,5 do 200 mm (Obr. 11). CNF s vyšší krystalickou orientací mají skvělý potenciál pro elektrickou a tepelnou vodivost v kompozitech. Především díky dobrým vlastnostem uhlíkových nanovláken jimiž jsou nízká hustota, vysoký modul pružnosti, vysokou pevnost vysokou vodivost a tepelnou stabilitu cementového kompozitu. [24]



Obr. 11: Snímek skupiny CNF pod mikroskopem. [30]

CNT – (carbon nanotubes) uhlíkové nanotrubičky se dělí do dvou skupin: **Jednotěnné** (SWCNTs), jsou bezdefektní a mají obvykle průměr okolo 1 nm a délku 5 μm . Vykazují výbornou elektrickou a tepelnou vodivost. **Vicestěnné** (MWCNTs) se skládají z několika SWCNTs a mají vnitřní vzdálenost do 0,36 nm. I když se jedná o skupinu SWCNTs, mají velmi odlišné vlastnosti, protože jejich spojením dojde k výraznému ovlivnění jejich vlastností (Obr. 12). [31]



Obr. 12: SWCNTs a MWCNTs. [31]

SF – (steel fiber) ocelová vlákna různých délek a tvarů se již poměrně dlouho používají ke snížení vzniku trhlin (Obr. 13). Mísení probíhá volným přisypáváním do čerstvé směsi. Vlákna se používají buď bez povrchové úpravy – ze surové oceli, nebo s povrchovou úpravou – pocínovaná nebo pozinkovaná. Ideální množství ocelových vláken v cementovém kompozitu má pozitivní vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti, což výrazně zvyšuje odolnost proti praskání, nárazu, únavě, ohýbání a trvanlivosti. Bylo zjištěno, že nejvhodnějšími rozměry do Self-sensing concrete jsou délka 32 mm a průměr 0,64 mm. ^[24]



Obr. 13: Cementový kompozit s SF. ^[32]

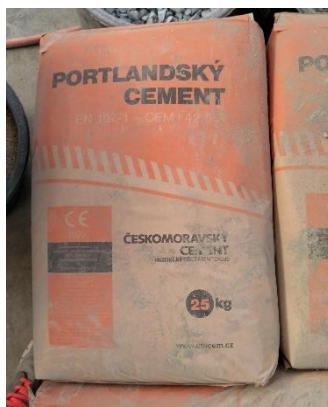
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3. Cementový kompozit s přidanými uhlíkovými vlákny

Pro experimentální část bakalářské práce byla jako vodivá fáze vybrána uhlíková vlákna (CF), tedy vláknitý druh vodivé fáze. CF je typ uhlíkových vláken (viz. Str. 19), který se přidává do kompozitu pro zlepšení elektrických vlastností, ale je od něj očekáváno i zlepšení v tahu za ohybu. Byly provedeny mechanické zkoušky na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, elektrické vlastnosti na vzorcích o rozměrech 40 x 40 x 20 mm a tepelné vlastnosti na krychlích o rozměrech 70 x 70 x 70 mm.

3.1 Složení směsí

Cement: Byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R (Obr. 14). Jedná se o cement s rychlým nárůstem pevnosti, rychlým a vysokým vývinem hydratačního tepla a dobrou stálostí fyzikálních a chemických vlastností. Minimální pevnost po 28 dnech je 42,5 MPa. Cement byl uchováván na paletě v suchu bez možnosti kontaktu s vodou, aby nedošlo k jeho navlhnutí.



Obr. 14: Portlandský cement CEM I 42,5R, výrobce Českomoravský cement. [35]

Kamenivo: Jako kamenivo byl zvolen křemičitý písek s velikostí zrn 0,063 – 1,2 mm (Obr. 15). Byl použit jemný písek, aby kamenivo neovlivnilo měření mechanických, tepelných či elektrických vlastností v malých vzorcích. Rovněž i kamenivo bylo uchováváno na paletě v suchu, aby případná zvýšená vlhkost neměla vliv na vodní součinitel cementového kompozitu a tím i na mechanické vlastnosti.



Obr. 15: Křemičitý písek, výrobce Sklopísek Střeleč. ^[35]

Voda: Byla použita běžná pitná voda z vodovodního řádu, která byla řádně dávkována, aby nedošlo ke změně stupně konzistence směsí.

CF: Funkčním plnivem byla uhlíková vlákna. Pro dobrou elektrickou vodivost, vysokou pevnost, nízkou měrnou hmotnost, velkou tepelnou odolnost a vysoký modul pružnosti se hodí pro většinu „chytrých“ betonů (Self-sensing concrete, Self-heating concrete, Magnetic-shielding concrete). Výhodou je, že i relativně malé množství vláken (1-4%) způsobí požadovaný efekt, což je výhodné z ekonomického hlediska. Vlastnosti CF jsou uvedeny na Obr.11. Problematickou částí je jejich přimíchání do cementového kompozitu. Nelze je přimíchat do směsi volně jako například kamenivo. Nejprve musí být zhomogenizovány ve vodní lázni. Zhomogenizovaná suspenze se následně přidává do směsi s ohledem na korekci vodního součinitele.

Vlastnosti	Hodnota
Délka vlákna	3 mm
Objemová hmotnost	1750 kg/m ³
Typická objemová hustota	350 g/l
Pevnost v tahu	4.275 MPa
Modul pružnosti v tahu	225 GPa
Maximální protažení	1.90%
Tloušťka	7 μm
Měrný elektrický odpor	1.380 μΩ cm
Obsah vlhkosti	< 0.3 %

Tab. 6: Základní vlastnosti použitých CF.^[31]

3.2 Homogenizace uhlíkových vláken

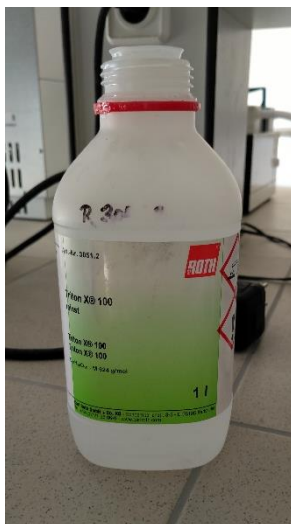
Homogenizace uhlíkových vláken je zásadní pro výstavbu vodivé sítě v cementovém kompozitu. Jde o proces, pomocí kterého dojde k maximálnímu rozptýlení vláken, které jsou výrobcem dodány ve formě drobných pelet. Nemělo by dojít k tomu, že se vytvoří místa s větším obsahem uhlíkových vláken, a tím i k oslabení konstrukce. Postup homogenizace byl následující:

- 1) Zjištění potřebného množství uhlíkových vláken pro jednotlivé vzorky. Bylo připraveno určité množství vody v nádobě, do kterého se přidalo dané množství uhlíkových vláken. Roztok nemohl být příliš hustý, protože by nebylo možné dobře rozmíchat vlákna ve vodě, ale nemohl být ani příliš řídký, aby nebyl překročen vodní součinitel, proto byl zvolen maximálně 7% roztok (viz. tab. 7).

LUKOSAN – jde o látku homogenní směsi metylsilikonového oleje a aerogelu oxidu křemičitého. Má dobrou odolnost proti změnám teplot a vykazují i malou změnu konzistence. Jsou chemicky odolné, hydrofobní, ve vlhkém prostředí neoxidují a zabráňují vzniku koroze. V našem použití je používán z důvodu odpěňování. Při homogenizaci dochází k napěnění.

Triton x – Je neiontový, oktylfenol-ethoxylátový surfaktant s vynikajícím detergentem používaným v mnoha aplikacích včetně textilií a agrochemikálií.^[34]

- 2) Přidání speciálního přípravku napomáhalo rozptýlení vláken. Jednalo se o přípravek s názvem Triton X® 100 (Obr. 16). Neředěný Triton X® 100 je čirá vazná tekutina díky vodíkové vazbě jeho hydrofilních částí z polyethylenoxidu a je dobře rozpustitelný ve vodě při cca 25°C. Bylo přidáno 0,5 % k hmotnosti uhlíkových vláken.



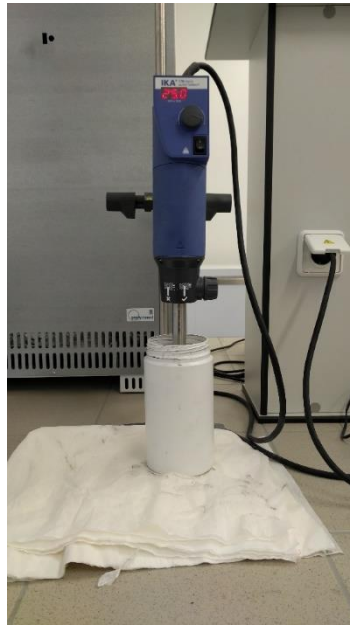
Obr. 16: Přípravek Triton X® 100 pro lepší rozptýlení vláken. [35]

- 3) Další přidáním přípravek byl silikonový odpěňovač LUKOSAN (Obr. 17), který snižoval napětí suspenze při homogenizaci za vysokých otáček (cca 25.000 ot. min⁻¹)



Obr. 17: Silikonový odpěňovač LUKOSAN. [35]

- 4) Po dokončení veškerého vážení a míchání byla suspenze připravena na homogenizaci pomocí homogenizátoru ULTRA – TURRAX T18 (Obr. 18). Rozptylování vláken v roztoku probíhalo přibližně 30-45 minut a bylo třeba dohlížet na stav suspenze, aby bylo rozptýlení uhlíkových vláken kvalitní a netvořily se hrudky slepených vláken (Obr. 19).



Obr. 18: Homogenizátor ULTRA – TURRAX T18 CF. [35]



Obr. 19: Srovnání zhomogenizovaných uhlíkových vláken. Nekvalitně zhomogenizované (vlevo), kvalitně zhomogenizované (vpravo). [35]

3.3 Příprava směsí

Po homogenizaci uhlíkových vláken ve vodě bylo možné přistoupit k přípravě cementové malty. Jako první byl do mísy pro míchání přidán křemičitý písek s cementem (množství viz. Tab. 7). Proběhlo promíchání nasucho přibližně 60 sekund. Poté byl přidáván roztok s uhlíkovými vlákny (pouze voda u referenčního vzorku viz. obr.20) a případně upravené množství vody pro dodržení vodního součinitele a opět míchání přibližně 60 sekund. Když byla hmota dostatečně rozmíchána přistoupilo se ke zkoušce rozlití kužele na setřásacím stolku pro zjištění zpracovatelnosti.



Obr. 20: Přidávání vody k rozmíchanému cementu s pískem. ^[35]

Zkouška rozlití kužele: Pro naše účely byl použit malý kužel na setřásacím stolku dle ČSN EN 1015-3. Jde o ocelový válec o výšce 60 mm položený na skleněném podkladu. Oba materiály byly před použitím očištěny tkaninou, utřeny do sucha a následně byly povrchy nastříkány jemnou vrstvou oleje. Kužel jsme umístili do středu skleněného podkladu a plnili ho ve dvou etapách, přičemž po každé vrstvě byl hutněn deseti vpichy kulatým nenasákavým dusadlem. Přebytná malta byla odebrána a poté se odstranil ocelový kužel. Po odstranění kuželu dojde k 15 ranám setřásacím stolkem, kdy dojde k rozlití. U první zkoušené referenční malty bez přidané vodivé fáze s vodním součinitelem 0,4 bylo sednutí velmi malé, které odpovídalo stupni konzistence S1 (Obr. 21), proto byl vodní součinitel zvýšen na konečných 0,52, kde zpracovatelnost byla ideální (Obr. 22). Důležitým zjištěním bylo, že přítomnost uhlíkových vláken neměla vliv na zpracovatelnost, proto nebylo nutné měnit vodní součinitel.



Obr. 21: Sednutí kužele referenčního vzorku s vodním součinitelem 0,4. [35]



Obr. 22: Sednutí kužele referenčního vzorku s vodním součinitelem 0,52. [35]

Složky/Materiál	Ref	CF	CF	CF	CF	CF	CF	CF
% vodivá fáze/CF	0,00%	0,50%	1,00%	1,50%	2,00%	2,50%	3,00%	3,50%
cement [g]	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
písek PG1 [g]	3750	3750	3750	3750	3750	3750	3750	3750
Suspenze [%]	0,00%	2,50%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	7,00%	7,00%
Množství suspenze [g]	0	250	250	375	500	625	535	625
Množství vodivé fáze v suspenzi [g]	0	6,25	12,5	18,75	25	31,25	37,45	43,75
voda ze suspenze [g] - CF	0	243,75	237,5	356,25	475	593,75	497,55	581,25
teoreticky přidaná voda [ml][g]	650	400	410	290	180	60	150	70
voda celkem - ze suspenze + přidaná [ml/g]	650	643,75	647,5	646,25	655	653,75	647,55	651,25
w/c	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52

Tab. 7: Složení směsí. [35]

3.4 Výroba vzorků

V rámci experimentu bylo připraveno 8 směsí, které obsahovaly různé procentuální množství uhlíkových vláken (viz. Tab. 8), ze kterých byly vyrobeny 4 trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm (Obr. 23). Pro zjištění mechanických vlastností byly potřeba dle požadavků 3 trámečky, zkoušené v tahu za ohybu a v tlaku. Dále byly vyrobeny krychle o rozměrech 70 x 70 x 70 mm (Obr. 23) pro měření součinitele tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a součinitele teplotní vodivosti. Čerstvé vzorky byly přikryty fólií na 24 hodin. Poté byly odbedněny a vloženy do kádě s konstantní vlhkostí po dobu 28 dní. Po uplynulé době bylo možné provést jednotlivé zkoušky.

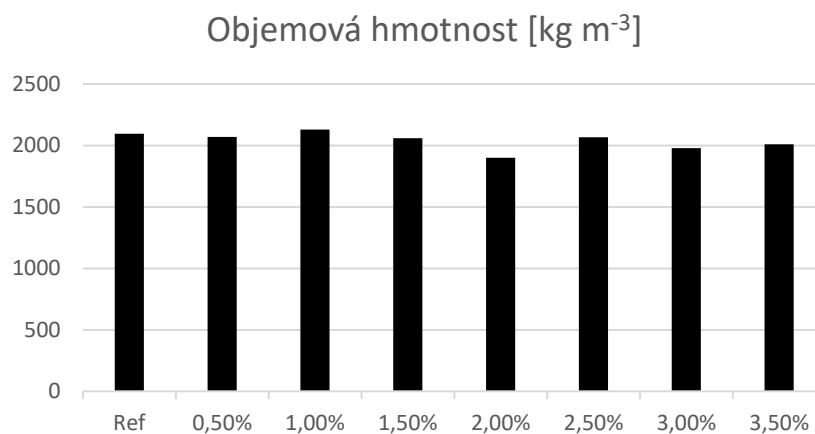


Obr. 23: Vzorky na vibračním stole. ^[35]

3.5 Experimentální výsledky

3.5.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost jednotlivých vzorků se pohybovala v rozmezí od 1979 kg m⁻³ do 2128 kg m⁻³ (Obr. 24) a výrazně se s množstvím CF neměnila.



Obr. 24: Objemová hmotnost kompozitů. ^[35]

3.5.2 Dynamický modul pružnosti

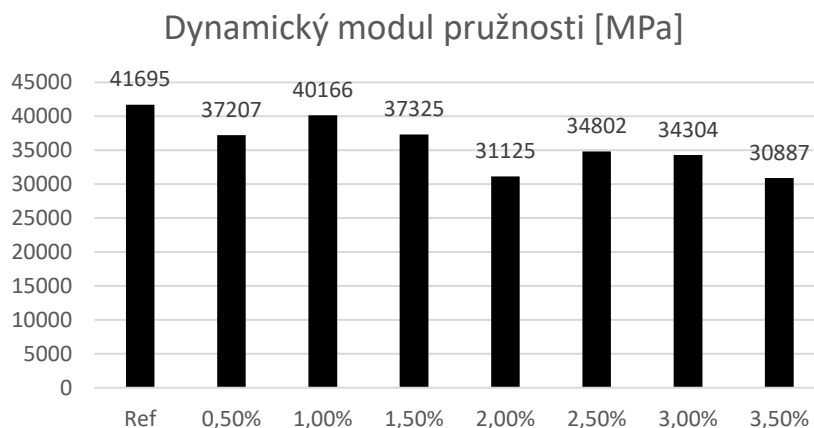
Dynamický modul pružnosti byl stanoven pomocí ultrazvukové impulsové metody, která je založena na zjišťování impulsové rychlosti dle ČSN EN 12504-4. [13] Princip zkoušky spočívá v měření doby průchodu impulsu ultrazvukového vlnění mezi sondami (viz. Obr. 25). Kontakt mezi sondami a měřeným vzorkem musí být dostatečný, proto musela být nanášena tenká vrstva akustického sono gelu. Impulsovou rychlost šíření zjistíme výpočtem z času šíření a délky měřící základny podle vztahu.

$$E_{\text{dyn,U}} = D \cdot v_1^2 \cdot (1/k^2) \cdot 10^{-6} \text{ [N mm}^{-2}\text{]} \quad (13)$$

Kde D je objemová hmotnost [kg m^{-3}], v_1 je rychlost šíření ultrazvukového impulsu [m s^{-1}] a k je koeficient rozměrnosti prostředí [-]. Z Obr. 26 je patrná klesající tendence, která kolísá u vzorků s 0,5 % a 2 % CF. S nižším modulem pružnosti hrozí tvorba drobných trhlinek, dochází k pomalejšímu šíření zvuku konstrukcí a povrch je měkčí. V našem případě je to ovlivněno fyzikálními vlastnostmi CF. Těmto ztrátám by se dalo předejít např. snížením vodního součinitele nebo změnou čáry zrnitosti kameniva.



Obr. 25: Měření dynamického modulu pomocí ultrazvuku. [35]



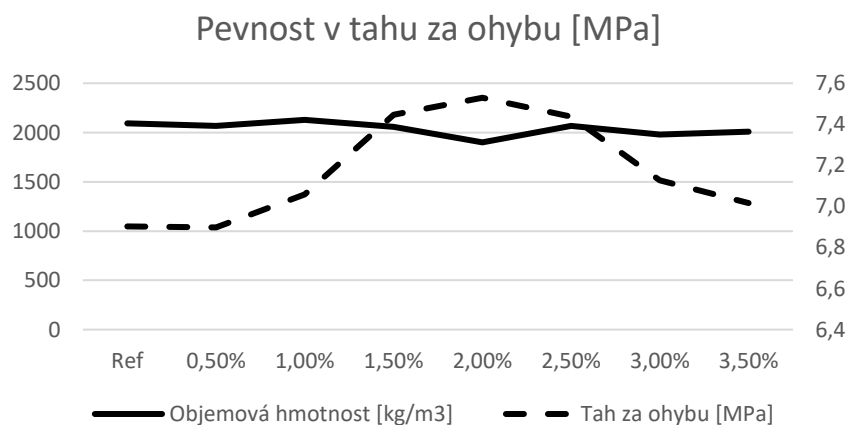
Obr. 26: Dynamický modul kompozitů. [35]

3.5.3 Pevnost v tahu za ohybu

Zkouška byla prováděna na třech trámečích každé směsi o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Před zkouškou bylo potřeba změřit přesnou geometrii každého trámečku, a pak ho správně uložit do lisu (Obr. 27). V našem případě byl měřen tříbodový ohyb. Vyjádření výsledků bylo pomocí vztahu $fd = \frac{F.l}{d_1.d_22}$ [MPa]. Kde F je maximální zatížení [N], l je vzdálenost mezi opěrnými válečky [mm], d₁ a d₂ jsou rozměry příčného řezu vzorku [mm]. Výsledky celé zkoušky jsou znázorněny na Obr 28. Hodnoty pevnosti v tahu se pohybovaly mezi hodnotami 6,8 MPa a 7,5 MPa. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u referenčního vzorku bez použitého funkčního plniva. Naopak nejvyšší pevnosti v tahu dosáhl vzorek se 2 % uhlíkových vláken. Ovšem vyšší množství než 2,5 % má za následek opětovné klesání pevnosti v tahu za ohybu.



Obr. 27: Trámeček vhodně umístěný v lisu. [35]



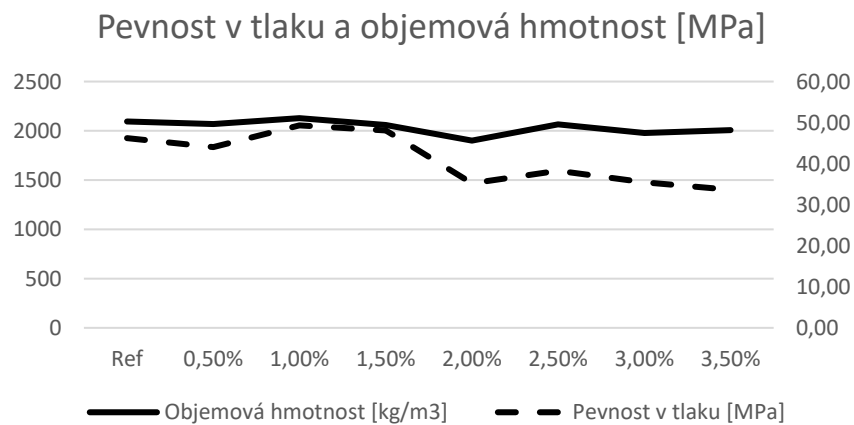
Obr. 28: Pevnost v tahu za ohybu v závislosti na objemové hmotnosti. [35]

3.5.4 Pevnosti v tlaku

Zkouška byla prováděna na rozlomených vzorcích z předchozí zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Tyto vzorky o rozměrech 40 x 40 mm (délka v této zkoušce nemá žádný vliv na výslednou pevnost) byly opět umístěny do lisu a každý vzorek byl rozdrčený (Obr. 29). Lis působil tlakovou silou, výsledný tlak na plochu byl přepočítán dle jednoduchého vztahu $Fcd = \frac{F}{S}$ [MPa]. Kde F je síla lisu [N], S je plocha tlačného vzorku [mm²]. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 30 a je viditelné, že přibývajícím množstvím uhlíkových vláken kolísavě mění pevnost v tlaku. To je způsobeno vytvořenými póry kolem jednotlivých vláken CF, které způsobují snížení objemové hmotnosti.



Obr. 29: Vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku. ^[35]



Obr. 30: Pevnost v tlaku v závislosti na objemové hmotnosti. ^[35]

3.5.5 Měrná elektrická vodivost

Elektrické vlastnosti byly stanoveny na vzorcích rozřezaných z trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. K tomu bylo potřeba rozřezání jednoho trámečku na díly o rozměrech 40 x 40 x 20 mm. Před měřením měrné elektrické vodivosti byly vzorky vysušeny exsikátoru po dobu jednoho týdne. Poté byly jejich boční strany (40 x 40 mm), které plnily roli elektrod, natřeny vodivou uhlíkovou pastou SPI Supplies (Obr. 31).



Obr. 31: Vzorek s CF příměsí potřený uhlíkovou pastou. ^[35]

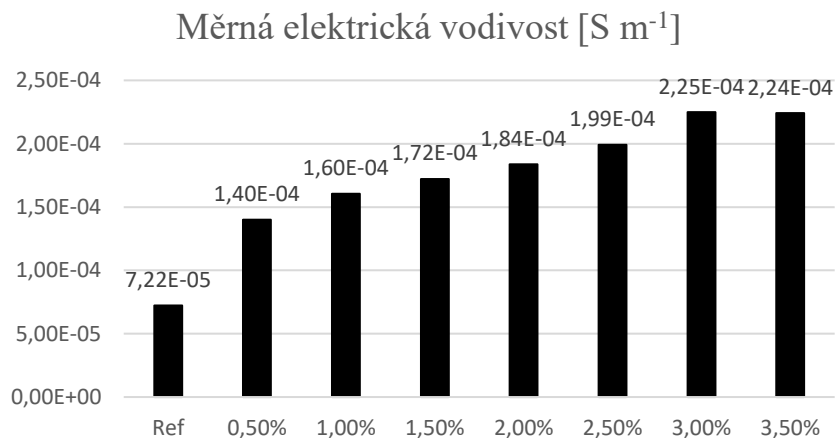
Pomocí přístroje FLUKE 8846A s využitím čtyřelektrodevého zapojení s DC buzením byl změřen elektrický odpor. Měrný elektrický odpor materiálu ρ [Ωm] byl následně stanoven s ohledem na tvarovou geometrii vzorků pomocí vztahu:

$$\rho = R \cdot (S/l) \quad (13)$$

Kde R [Ω] je naměřený elektrický odpor materiálu, S [m^2] je plocha elektrod a l [m] je vzdálenost mezi elektrodami. Výsledná měrná elektrická vodivost σ – [S m^{-1}] byla stanovena jako převrácená hodnota měrného elektrického odporu

$$\sigma = 1/\rho \quad (13)$$

Měřením bylo potvrzeno, že uhlíková pasta, pomocí níž byly aplikovány rovinné elektrody, je schopna zajistit dostačující kontakt materiálu s vodiči připojenými k danému měřicímu přístroji. Závislost měrné elektrické vodivosti na množství uhlíkových vláken je znázorněna na Obr. 32. Měrná elektrická vodivost se výrazně zvýší oproti referenčnímu vzorku, ovšem potom se vzestup mírní a stoupá jen pozvolna, což z hlediska použitelnosti pro self-heating concrete není dostačující hodnota. Musely by být provedeny další zkoušky na vzorcích s vyšším procentuálním zastoupením uhlíkových vláken.

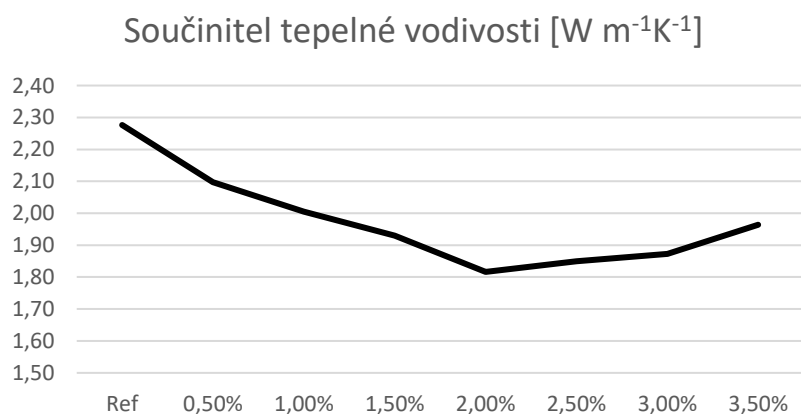


Obr. 32: Závislost měrné elektrické vodivosti na množství CF. ^[35]

3.5.6 Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti cementového kompozitu s přidáním vodivé fáze CF byly měřeny na krychlích o rozměrech 70 x 70 x 70 mm. Měření probíhalo pomocí přístroje Isomet 2114 a byly vždy měřeny třikrát. Výsledná hodnota byla průměrem těchto tří měření:

Součinitel tepelné vodivosti λ [$\Omega\ m^{-1}K^{-1}$]: je to hodnota říkající, jakou má daný materiál schopnost vést teplo za určitý čas. Pro náš kompozit s přidáním uhlíkových vláken je tepelná vodivost znázorněna na Obr. 33. Nejnížší hodnoty vykazovaly vzorky od 1,5 % do 3 % uhlíkových vláken.

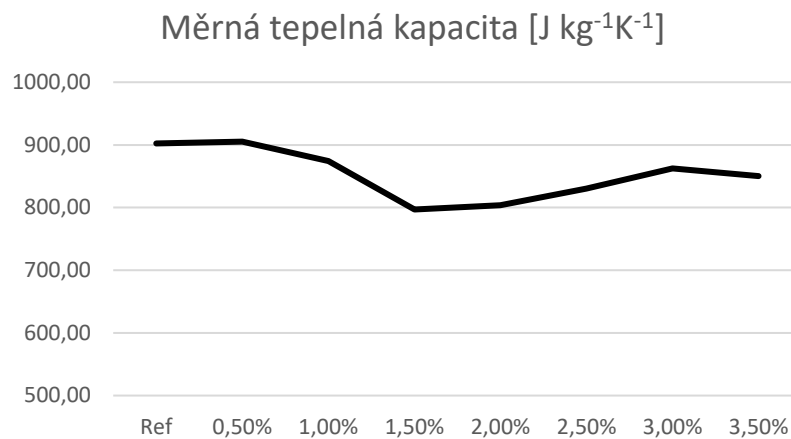


Obr. 33: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na množství CF. ^[35]

Měrná tepelná kapacita c [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]: jde o hodnotu říkající, kolik energie musím dodat látce, abych 1 kg ohřál o 1 °C. Vypočte se pomocí jednoduchého vztahu

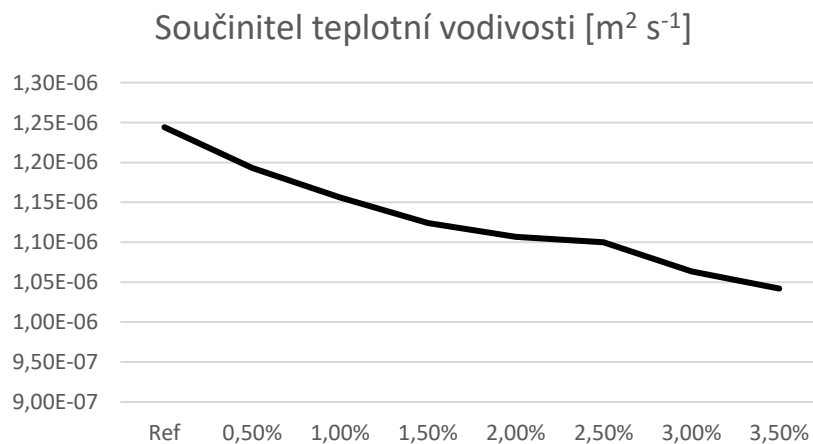
$$c = \frac{C_p}{\rho v} \quad (34)$$

Kde C_p [$\text{W m}^{-3} \text{K}^{-1}$] je objemová tepelná kapacita změřená pomocí přístroje Isomet 2114 a ρv [kg m^{-3}] je objemová hmotnost materiálu. Měrná tepelná kapacita našeho kompozitu je znázorněna na Obr. 34. Opět byly nejideálnější vzorky s 1,5 % a 2 % uhlíkových vláken.



Obr. 34: Měrná tepelná kapacita v závislosti na množství CF. ^[35]

Součinitel teplotní vodivosti: α ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) hodnota znázorňující schopnost stejnorodého materiálu o známé vlhkosti vyrovnávat teploty při neustáleném vedení tepla. ^[33] Výsledky našeho měření jsou znázorněny na Obr. 35



Obr. 35: Součinitel teplotní vodivosti v závislosti na množství CF. ^[35]

4. Diskuze

Postupem času se s nároky na zlepšování kvality používaných materiálů začaly zvyšovat rovněž nároky na kvalitu a současně míru použitelnosti cementových kompozitů. Aspektem pro zvrát bylo použití tzv. funkčního plniva, protože tu najednou byla možnost vyrobit cementový kompozit s takovými vlastnostmi, které samotný obyčejný kompozit nemůže nikdy dosáhnout. Pro takové kompozity se začíná používat název „chytrý beton“, který se čím dál více prosazuje do využívání ve stavebních konstrukcích. Označení „chytrý beton“ tak znamená nejen zlepšení mechanické pevnosti, především pevnosti v tahu za ohybu, ale primárně zlepšení elektrických vlastností, které mění beton z izolantu na vodivý materiál. To vše má za následek elektricky vodivé funkční plnivo, které je základem pro „chytřejí betony“.

Předložená bakalářská práce pojednává o míře vlivu složení na mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti. Pozornost byla věnována především na množství uhlíkových vláken v cementovém kompozitu pro dosažení takových elektrických vlastností, které budou dostatečné pro vytvoření self-sensing concrete a self-heating concrete. Cílem této práce bylo tedy připravit sérii vzorků s proměnným obsahem uhlíkových vláken a zjištění jejich vlastností.

Nejprve byl vytvořen plán experimentů, na jehož základě bylo vytvořeno 8 typů směsí, kde každá vytvořená směs obsahovala 4 vzorky. Z nich 3 byly použity na mechanické vlastnosti a dynamický modul a jeden byl rozřezán na elektrické vlastnosti. Při samotné přípravě směsí byly použity a kombinovány tyto materiály: portlandský cement (42,5 R), jemný křemičitý písek (frakce 0,063 – 1,2 mm), uhlíková vlákna rozmíchaná ve vodním prostředí pomocí homogenizačního přístroje a přesného postupu. Dynamický modul pružnosti byl měřen po 28 dnech na všech vzorcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm pomocí ultrazvukového přístroje. Hodnoty dynamického modulu měly s přibývajícím množstvím uhlíkových vláken lehce klesající tendenci a pohybovaly v rozmezí od nejvyšší hodnoty 41695 do 30887 MPa. Zlepšení modulu pružnosti by bylo možné docílit zvolením kameniva s vyšší kvalitou. Mechanické vlastnosti (pevnost v tahu za ohybu a v tlaku) jednotlivých vzorků byly měřeny po 28 dnech ve vlhkém prostředí pomocí lisu na třech trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Pevnost v tahu za ohybu měla vzrůstající tendenci do 2 %, poté pevnost opět klesala.

Nejvyšší hodnota byla naměřena 7,5 MPa, což je vyšší hodnota než u prostého betonu bez využití funkčního plniva.

Dalším úkolem bylo zjištění měrné elektrické vodivosti. K tomu byly použity rozřezané vzorky o rozměrech 40 x 40 x 20 mm. K dosažení dostatečných vodivých vlastností bylo nutné potříit kontaktní strany (40 x 40) uhlíkovou pastou. Pro měření byla zvolena čtyř-vodičová metoda pomocí přístroje Fluke 2X4. Díky tomuto přístroji byl změřen měrný elektrický odpor, který byl následně přepočítán na měrnou elektrickou vodivost. U referenčního vzorku byla naměřena hodnota řádově nižší než u vzorků (10^{-5} S m^{-1}), které obsahovaly funkční plnivo. S rostoucím množstvím vláken rostla i měrná elektrická vodivost až do hodnoty $2,25 \cdot 10^{-4} \text{ S m}^{-1}$. Nejedná se o hodnotu dostatečnou pro vytvoření ideální vodivé sítě, což může být zapříčiněno nízkým množstvím vláken či „kamínky“ písku.

Posledním úkolem bylo určení tepelně-fyzikálních vlastností (součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita). Tyto vlastnosti byly měřeny na vzorcích o rozměrech 70 x 70 x 70 mm. Na zcela vysušených vzorcích proběhlo měření pomocí přístroje ISOMET. Hodnoty byly zapsány a následně vytvořené grafy ukázaly (viz Obr. 33 a Obr. 34), že vzorky v rozmezí 1,5 – 2 % vykazovaly nejlepší vlastnosti.

5. Závěr

Předmětem této bakalářské práce bylo nastínit možnosti použití betonu s elektricky vodivými funkčními plnivými a uvést příklady, ve kterých by tento materiál mohl být s výhodou použit. Cílem experimentální části byl návrh a výroba kompozitu s dostatečným množstvím uhlíkových vláken a zároveň s minimálním snížením mechanických vlastností.

V teoretické části byly popsány vlastnosti klasických cementových kompozitů bez přidané vodivé fáze, jejich složky a rozdíly ve vlastnostech oproti cementovým kompozitům s vodivou fází. Dále byla uvedena specifika jednotlivých funkčních plniv, specifika technologie výroby a konkrétní případy při použití v praxi.

V rámci experimentální části byla navržena směs, která vykazovala nejlepší vlastnosti. Bylo tedy ověřeno, že směs s 1,5 % uhlíkových vláken v kompozitu je nejjednodušším řešením. Vykazovala pevnost v tahu za ohybu 7,45 MPa. Byla sice nižší než směs s 2 % (7,53 MPa), za to pevnost v tlaku měl téměř o 15 MPa vyšší. Měrná tepelná kapacita byla na hodnotě $796,91 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ a byla v tomto ohledu nejlepší ze všech vzorků. Součinitel tepelné vodivosti měl na velmi dobré hodnotě. Porovnáním všech těchto aspektů byl vzorek s 1,5 % uhlíkových vláken zvolen jako ideální kompozit. Dá se tedy hovořit o zlepšení elektrické vodivosti oproti referenčnímu vzorku, ale hodnoty nebyly natolik vysoké, aby bylo možné prohlásit vhodnost použití co self-heating concrete.

Cíle práce byly naplněny. Případné další zkoumání by se mělo ubírat ke zlepšení technologického procesu přípravy směsí, tj. dostatečná homogenizace vláken ve směsi, která může být ověřena různými zobrazovacími metodami – obrazovou analýzou nebo počítačovou tomografií. Vytvoření vodivé sítě by případně bylo vhodné pozorovat na z hlediska struktury jednodušším cementovém kompozitu, cementové pastě. Dalším zajímavým námětem pro budoucí výzkum je sledování elektrických vlastností cementových kompozitů obsahujících kombinaci elektricky vodivých vláken a částic.

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály definice a rozdělení [online]. Technická univerzita v Liberci [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
- [2] Kompozity [online]. [cit. 2013-02-12]. Dostupné z WWW: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [3] BODNÁROVÁ, L. Kompozitní materiály ve stavebnictví. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 122 s. ISBN 80-214-2266-1.
- [4] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0779-4.
- [5] EBETON. Složení betonu, složky betonu [online]. [cit. 23.3.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/slozeni-betonu-slozky-betonu>
- [6] EBETON. Cement [online]. [cit. 23.3.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/cement>
- [7] SVOBODA, Luboš a kol. Stavební hmoty. Bratislava: Jaga, 2004, ISBN 80-8076-007-1
- [8] EBETON. Cement, normalizované označení [online]. [cit. 23.3.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/cement-normalizovane-oznaceni>
- [9] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [10] eBeton. Přísady [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/prisady>
- [11] Checmické přísady do betonu [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.mujsbeton.cz/chemicke-prisady-do-betonu>

- [12] TZBINFO. Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů [online]. [cit. 4.4.2017]. Dostupný na WWW: <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>
- [13] TZBINFO. Dynamické a statické moduly pružnosti betonu [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu>
- [14] EBETON. Zkoušení betonu [online]. [cit. 4.4.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/zkouseni-betonu>
- [15] Technické podmínky TP 226. Vysokohodnotné betony pro mosty PK. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, Odbor silniční infrastruktury, 2010
- [16] EBETON. Pevnost betonu v tahu za ohybu - zkouška [online]. [cit. 4.4.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tahu-za-ohybu-zkouska>
- [17] FIALA, Lukáš. 123MAI [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/cviceni6.pdf>
- [18] Izolace-info.cz. FYZIKÁLNÍ VELIČINY [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.izolace-info.cz/technicke-informace/fyzikalni-veliciny/?nid=9174-soucinitel-teplotni-vodivosti-fyzikalni-veliciny-u-tepelne-ochrany-budov.html#.WRbmWeWGPIU>
- [19] Nabla. Tepelná kapacita, měrná tepelná kapacita [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/molekulova-fyzika-a-termika/tepelna-kapacita-merna-tepelna-kapacita.php>
- [20] G. E. Monfore, “The electrical resistivity of concrete” in Journal of the PCA Research Development Laboratories, 1968
- [21] MECHLOVÁ, Erika a Karel KOŠTÁL. Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz. Praha: Prometheus, 1999. ISBN 80-7196-151-5.

- [22] Polovodič. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8D>
- [23] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [24] HAN, Baoguo., Xun YU a Jinping. OU. Self-sensing concrete in smart structures. ISBN 978-0-12-800517-0.
- [25] Lepil O., Šedivý P., Fyzika pro gymnázia, Elektřina a magnetismus, Prometheus, Praha 1998, ISBN 80-7196-088-8.
- [26] ALEKSANDR LEVCHENKO. 123RF [online]. [cit. 11.4.2017]. Dostupný na WWW: https://cz.123rf.com/photo_27300663_grafitov%C3%BD-pr%C3%A1%C5%A1ek-rozlit%C3%AD-ze-sklen%C4%9Bn%C3%A9n%C3%A1dob%C4%9B-na-b%C3%AD%C3%A9m-pozad%C3%AD.html
- [27] BEST. alibaba.com [online]. [cit. 11.4.2017]. Dostupný na WWW: <https://sc01.alicdn.com/kf/HTB11bg3IFXXXbiXpXXq6xXFXXXZ/Best12T-carbonyl-nickel-powder.jpg>
- [28] DUCHÁČEK, Vratislav a Zdeněk HRDLIČKA. Gumárenské suroviny a jejich zpracování. Vyd. 4., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009. ISBN 978-80-7080-713-2.
- [29] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [30] EUROLLS. Eurolls [online]. [cit. 11.4.2017]. Dostupný na WWW: http://www.eurolls.com/media/diogcatalog2/images/item/15/steel-fiber-production-lines-if.1_f.jpg
- [31] Lionetto, Francesca, a další. A methodology to orient carbon nanotubes in a thermosetting matrix. Composite Science and Technology. 2013

- [32] EUROLLS. Eurolls [online]. [cit. 11.4.2017]. Dostupný na WWW: http://www.eurolls.com/media/djcatalog2/images/item/0/steel-fiber-production-lines-if.1_f.jpg
- [33] Now. TRITON™ X-100 [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.dow.com/en-us/markets-and-solutions/products/TRITON/TRITONX100>
- [34] CENTER FOR SUSTAINABLE NANOTECHNOLOGY. sustainable nano [online]. [cit. 11.4.2017]. Dostupný na WWW: <http://sustainable-nano.com/2014/03/04/turning-plastic-bags-into-carbon-nanotubes/>
- [35] Vlastní zdroj

Seznam použitých tabulek

Tab. 1: Rozdělení cementů dle ČSN EN 197-1.....	15
Tab. 2.: Příměsi v cementu CEM II	15
Tab. 3: Minimální tlakové pevnosti cementů typu R a N	16
Tab. 4: Stupně konzistence a sednutí kužele	18
Tab. 5.: Rezistivity různých látek	26
Tab. 6.: Základní vlastnosti použitých CF	35
Tab. 7.: Složení směsí	39

Seznam použitých obrázků

Obr. 1. Dělení kompozitních materiálů podle tvaru a uspořádání výztuže	13
Obr. 2.: Poměr směsí zastoupené v cementovém kompozitu	14
Obr. 3.: Vzorčky pro krychelnou a válcovou zkoušku v tlaku	22
Obr. 4.: Zkouška pevnosti ve čtyřbodovém ohybu	23
Obr. 5.: Příklad využití Self-sensing concrete pro automobilovou dopravu	27
Obr. 6.: Grafitový prášek GP	29
Obr. 7.: Grafitový prášek GP pod mikroskopem	29
Obr. 8.: Niklový prášek NP	29
Obr. 9.: Niklový prášek NP pod mikroskopem	29
Obr. 10.: Porovnání velikosti CF s lidským vlasem	31
Obr. 11.: Snímek skupiny CNF pod mikroskopem	31
Obr. 12.: SWCNTs ve srovnání s MWCNTs	32
Obr. 13.: Cementový kompozit opatřený SF	32
Obr. 14.: Portlandský cement CEM I 42,5R, výrobce Českomoravský cement	33
Obr. 15.: Křemičitý písek, výrobce Sklopísek Střeleč	34
Obr. 16.: Přípravek Triton X® 100 pro lepší rozptýlení vláken	36
Obr. 17.: Silikonový odpěňovač LUKOSAN	36
Obr. 18.: Homogenizátor ULTRA – TURRAX T18 CF	37
Obr. 19.: Srovnání zhomogenizovaných uhlíkových vláken	37
Obr. 20.: Přidávání vody k rozmíchanému cementu s pískem	38
Obr. 21.: Sednutí kužele referenčního vzorku s vodním součinitelem 0,4	39
Obr. 22.: Sednutí kužele referenčního vzorku s vodním součinitelem 0,52	39
Obr. 23.: Vzorčky na vibračním stole	40
Obr. 24.: Objemová hmotnost kompozitů	40
Obr. 25.: Měření dynamického modulu pomocí ultrazvuku	41
Obr. 26.: Dynamický modul kompozitů	41
Obr. 27.: Trámeček vhodně umístěný v lisu	42
Obr. 28.: Pevnost v tahu za ohybu v závislosti na objemové hmotnosti	42
Obr. 29.: Vzorek po zkoušce pevnosti v tlaku	43
Obr. 30.: Pevnost v tlaku v závislosti na objemové hmotnosti	43

Obr. 31. Vzorek s CF příměsí potřený uhlíkovou pastou	44
Obr. 32.: Závislost měrné elektrické vodivosti na množství CF	44
Obr. 33.: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na množství CF	45
Obr. 34.: Měrná tepelná kapacita v závislosti na množství CF	46
Obr. 35.: Součinitel teplotní vodivosti v závislosti na množství CF	46