



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**PROBLEMATIKA UŽITÍ UHLÍKOVÝCH
NANOTRUBIČEK V CEMENTOVÝCH
KOMPOZITECH**

THE ISSUE OF THE USE OF CARBON NANOTUBES IN CEMENT COMPOSITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Klára Pacltová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Klára Pacltová
Název	Problematika užití uhlíkových nanotrubiček v cementových kompozitech
Vedoucí práce	Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Raki L., Beaudion J., Alizadeh R., Makar J., Sato T.: Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. Materials 2010, 3.
Grobert N.: Carbon nanotubes becoming clean. Mater Today 2007, 10 (1-2), pp. 28-35.
Popov V.N.: Carbon nanotubes: properties and application. Mater Sci Eng R, 2004; 43.
Wong E. W., Sheehan P. E., Lieber C. M.: Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. Science 1997, 277 (5334), pp. 1971-1975.
Yazdanbakhsh A., Grasley Z., Tyson B., Abu Al-Rub R. K.: Distribution of carbon nanofibers and nanotubes in cementitious composites. Transp Res Rec, 2010, 2142, pp. 89-95.
Abu Al-Rub R.K., Tyson B.M., Yazdanbakhsh A., Grasley Z.: Mechanical properties of nanocomposite cement incorporating surface-treated and untreated carbon nanotubes and carbon nanofibers. ASCE J Nanomech Micromech, 2012, 2(1), pp. 1-6.
Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus, Science direct a další.
Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Aplikace nanočástic do cementových kompozitů ovlivňuje vlastnosti těchto kompozitů. Výsledné vlastnosti kompozitu závisí na vlastnostech nanočástic, velmi důležitou podmínkou pro kladný efekt přídavku nanočástic je způsob výroby kompozitu, zejména homogenizace část v kompozitu.

V teoretické části bakalářské práce proveďte rešerši informací o efektu přídavku uhlíkových nanotrubiček na vlastnosti cementových kompozitů. Sumarizujte producenty uhlíkových nanotrubiček a porovnejte parametry komerčně vyráběných nanotrubiček.

V experimentální práci bakalářské práce připravte cementový kompozit s přídavkem uhlíkových nanotrubiček. Vyzkoušejte různé dávky uhlíkových nanotrubiček. Ověřte vliv přídavku uhlíkových nanotrubiček na fyzikální vlastnosti cementových kompozitů.

Minimální rozsah bakalářské práce 45 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Lenka Bodnářová, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá posouzením účinnosti uhlíkových nanočástic v cementových kompozitech. Teoretická část bakalářské práce je zaměřena na rešerši informací o uhlíkových nanotrubičkách a jejich vlivu na cementové kompozity. Praktická část navazuje na rešerše z části teoretické, kde je ověřena účinnost uhlíkových nanočástic v cementových kompozitech při různém dávkování.

KLÍČOVÁ SLOVA

nanočástice, uhlíkové nanotrubičky, cementový kompozit, dispergace

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the analysis of the efficiency of carbon nanoparticles in cement composites. The theoretical part of the bachelor thesis is focused on the research of information about carbon nanotubes and their influence on cement composites. The practical part follows the research of the theoretical part, where is verified the effectiveness of carbon nanotubes in cement composites at different dosages.

KEYWORDS

nanoparticle, carbon nanotubes, cement composite, dispersion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Klára Pacltová *Problematika užití uhlíkových nanotrubiček v cementových kompozitech*. Brno, 2017. 48 s., 3 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2017

Klára Pacltová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala své vedoucí Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za vedené mé bakalářské práce a odborné rady. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Tomáši Jarolímovi za pomoc při experimentální části a odborné konzultace při zpracování teoretické části. Mé poděkování dále patří celé rodině a blízkým, kteří mi byli oporou po celou dobu studia.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I. TEORETICKÁ ČÁST	11
1 NANOTECHNOLOGIE	11
1.1 Nanotechnologie ve stavebnictví	11
1.1.1 Pasivní využití nanotechnologií	12
1.1.2 Aktivní využití nanotechnologií	12
2 UHLÍKOVÉ NANOTRUBIČKY (CNT).....	13
2.1 Uhlík	13
2.2 Historie CNT	14
2.3 Struktura uhlíkových nanotrubiček	15
2.4 Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček	16
2.4.1 Mechanické vlastnosti	16
2.4.2 Elektrické vlastnosti.....	17
2.4.3 Tepelné vlastnosti	17
2.4.4 Toxicita uhlíkových nanotrubiček	17
2.5 Výroba uhlíkových nanotrubiček	19
2.5.1 Obloukový výboj.....	19
2.5.2 Laserová ablace	20
2.5.3 Chemická depozice z plynné látky (CVD – Chemical Vapor Deposition)	21
3 KOMERČNĚ VYRÁBĚNÉ CNT	23
3.1 Významní producenti CNT	23
3.1.1 Yurui (Shanghai) Chemical Co., Ltd.....	23
3.1.2 Nanocyl, Inc.	23
3.1.3 Shenzhen Nanotech Port Co. Ltd (NTP)	23
3.1.4 Chasm Advanced Materials, Inc.....	23
3.1.5 NanoIntegris.....	24
3.2 Komerčně vyráběné MWCNT	24
3.3 Komerčně vyráběné SWCNT	25
4 CEMENTOVÉ KOMPOZITY S CNT	26
4.1 Výzkum užití CNT v cementových kompozitech	27
4.1.1 Optimální dávkování uhlíkových nanotrubiček do cementových malt	28
4.2 Použití cementových kompozitů s CNT	29

4.3	Dispergace uhlíkových nanotrubiček	30
4.3.1	Povrchově aktivní látky	30
4.3.2	Ultrazvukové rozptylování uhlíkových nanotrubiček.....	31
4.3.3	Metoda generování tlakové pulsace ve vysokotlakém systému vodního prostředí	32
II.	PRAKTICKÁ ČÁST	33
5	CÍL.....	33
6	POUŽITÉ SUROVINY A ZAŘÍZENÍ.....	33
6.1	Použité suroviny	33
6.2	Použité zařízení.....	33
7	RECEPTURY	34
8	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	35
9	POSTUPY ZKOUŠEK.....	37
9.1	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu	37
9.2	Stanovení pevnosti v tlaku	38
10	VÝSLEDKY ZKOUŠEK	39
10.1	Pevnost v tahu za ohybu	39
10.2	Pevnost v tlaku	40
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ	41
12	ZÁVĚR	42
13	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	48
	SEZNAM TABULEK	48
	SEZNAM GRAFŮ	48
	PŘÍLOHY	49

Úvod

Nanotechnologie jsou novým oborem, který se v posledních letech začíná rozšiřovat. Jelikož je tendencí posledních let neustále vylepšovat vlastnosti používaných materiálů a tím i následně výrobků, je velká snaha výzkum použití nanotechnologií rozšířit do provozu. Nanotechnologie pracují s velice malými částicemi, přesněji nanočásticemi, které nabývají velikosti v rozmezí 1 až 100 nm.

Využití nanotechnologií je velice široké, lze je použít v medicíně, textilním průmyslu, strojírenství či stavebnictví. Ve stavebnictví se používají jako nanopříměs. Budťo ve formě prášku, nebo rozptýlené v disperzi. Využívají se zejména pro své výborné vlastnosti, které předávají kompozitům, do kterých jsou přidávány.

Uhlíkové nanotrubičky patří mezi nanočástice, které se ve stavebnictví využívají zejména pro svou vysokou pevnost. Uvedení uhlíkových nanotrubiček do běžné výroby stavebních materiálů je otázkou mnoha let. Jejich nevýhodou je však značně nákladná výroba, která se podepisuje na ceně uhlíkových nanotrubiček a zároveň nutnost nanotrubičky důkladně rozptýlit.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Nanotechnologie

Nanotechnologie jsou vlastně klasické technologie, které jsou přeneseny do nanorozměrů. Název nanotechnologie v sobě skrývá řecký výraz „nanos“, který v překladu znamená trpaslík. Už z názvu je tedy jasné, že nanotechnologie je věda zabývající se velmi malými částicemi. Velikost zkoumaných částic je jedna miliardtina, tedy 10^{-9} . Pro představu, jedná se o zhruba deseti tisícinu tloušťky jednoho lidského vlasu. [1] [2]

Nanotechnologie jsou vědou celkem mladou. Jako jeden ze zakladatelů nanotechnologií je označován Richard Feynman. Ten roku 1959 představil Americké společnosti fyziků přednášku *There's Plenty of Room at the Bottom*, což volně přeloženo znamená Tam dole je spousta místa. V přednášce pronesl, že nevidí žádnou překážku pro cílenou manipulaci s atomy. Dnes je zřejmé, že už v té době měl Feynman pravdu. [3]

Využití nanotechnologií a potažmo nanočástic a nanomateriálů je velice široké. Nanotechnologie je možné použít v medicíně, textilním průmyslu, potravinářství, strojírenství, v oblasti elektrotechniky a v neposlední řadě ve stavebnictví. [2]

1.1 Nanotechnologie ve stavebnictví

Využití nanotechnologií ve stavebnictví je celkem nová věc. Hlavním cílem využití nanotechnologií ve stavebnictví je snaha neustále vylepšovat vlastnosti a zvyšovat odolnost používaných stavebních materiálů. Většinou se jedná o nanočástice, které je možné použít jako příměsi do nátěrů, omítek či betonů. Dále se využívají nanovlákná, která lze použít jako transportní bariéry, tedy tepelnou izolaci, nebo jako složku výztužnou. V tomto případě se nanovlákná chovají jako rozptýlená výztuž. Ač je použití nanotechnologií velice lákavé, jejich většímu prosazení v praxi brání zejména vysoké ceny. V současné době jsou nanočástice stále mnohonásobně dražší než zaběhlé konvenční materiály. Kromě vysokých cen je rozhodující také složitost docílit rovnoměrného rozptýlení nanočástic a využít je tak jako rozptýlenou výztuž například v cementových kompozitech, či betonech. Nanočástice mají díky svému velkému měrnému povrchu a s tím souvisejícím vysokým povrchovým napětím tendenci se shlukovat a docílit tak menšího měrného povrchu. Proto je velmi důležité správně nanočástice dispergovat a následně stabilizovat. Využití nanomateriálů ve stavebnictví je dvojího typu – pasivní a aktivní. [4] [5] [6]

1.1.1 Pasivní využití nanotechnologií

Prvním typem je pasivní využití, kdy se z nanovláken vytváří laditelné molekulové filtry, které je možné dále upravovat například plazmaticky. Při této transformaci je možné upravit povrch filtru tak, aby byl hydrofobní, tedy odpuzoval vodu. Nebo naopak hydrofilní a vodu přitahoval. Těchto vlastností lze využít při ošetřování čerstvého betonu. Tenká vrstva z nanovláken, která je z jedné strany hydrofobní a z druhé hydrofilní položí na čerstvě zabetonovanou konstrukci a tím se značně zmírní odpařování vody při hydratačních procesech a zamezí se tak vzniku mikrotrhlin v betonu. Dále je možné ještě před samotným rozvlákněním přidat do roztoku polymeru například stříbro. Ve vzniklých vláknech je pak obsaženo stříbro, které je silně bakteriocidní. Po dalším zpracování těchto vláken vznikají filtry, které zachytávají velice malé částice a zároveň jsou bakteriocidní. Těchto vlastností lze využít při zateplování historických budov, kde často vlivem špatně fungující izolace dochází ke vzniku plísní a tím i následně k degradaci celé konstrukce. [7]

1.1.2 Aktivní využití nanotechnologií

Aktivní využití nanotechnologií se v současné době omezuje na čtyři hlavní oblasti. První oblast tvoří cementem pojené materiály. Do této oblasti patří především betony, a to ať už betony vysokopevnostní, silniční či fotokatalytické. Beton je tvořen třemi základními složkami, kterými jsou cement, kamenivo a voda. Této stavební hmoty se ve světě ročně použije více než 10 miliard tun. Jedná se tedy o jeden z nejrozšířenějších stavebních materiálů. Přidáním nanočástic do betonu můžeme jeho běžné vlastnosti výrazně zlepšit. Nanočástice mají vliv nejen na pevnosti betonů, ale i jeho zpracovatelnost a hlavně trvanlivost. Na výrobu fotokatalytického betonu, tedy betonu, který je schopný redukovat škodliviny v ovzduší. Toho je docíleno přidáním nanočástic TiO_2 , které při působení ultrafialového záření a vzdušné vlhkosti rozkládají bakterie a prach obsažený v ovzduší a tím vzduch „čistí“. Tento typ betonu byl v roce 2003 použit na stavbě Jubilee Church v Římě. Kostel si i po 14 ti letech od výstavby zachovává svou čistě bílou barvu. Mezi částice, které ovlivňují hydrataci cementu patří například nanosilika, která má kladný vliv na hydrataci cementu, obzvláště v tranzitních zónách mezi kamenivem a cementem. Kromě vlivu na pevnosti betonu, vykazuje vliv i na modul pružnosti cementové matrice. Další oblast použití tvoří izolační výrobky, ať už tepelné izolace či protihlukové izolace. Do třetí oblasti spadají různé typy filmů a nátěrů, které mají vést ke zlepšení funkčnosti materiálů. Z předchozího typu použití vyplývá i čtvrtá oblast použití, ve které se řeší protipožární ochrana. [5]



Obrázek 1 - Jubilee Church v Římě [5]

Pro zvýšení pevností materiálů je vhodné použít uhlíkové nanočástice, ať už nanotrubičky či fullereny, které jsou charakteristické vysokou pevností. Uhlíkové nanočástice jsou tvořeny pouze atomy uhlíku a jsou vázány vysoce pevnými vazbami. [8]

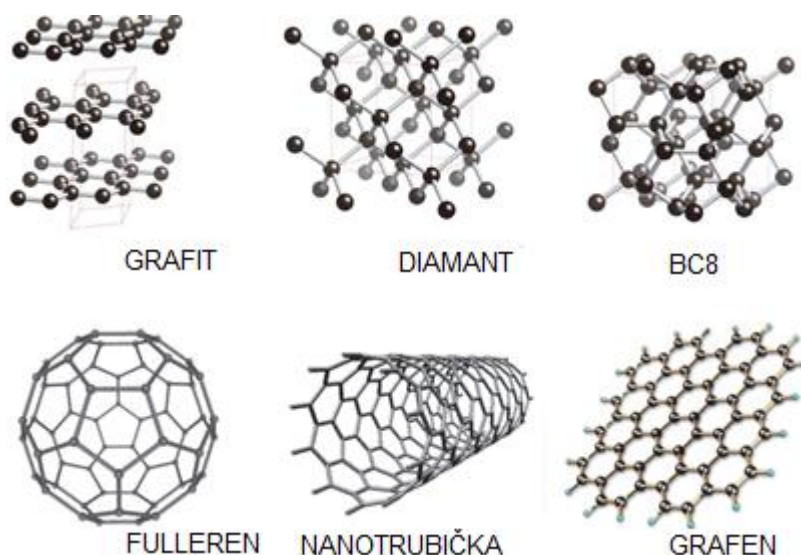
2 Uhlíkové nanotrubičky (CNT)

Uhlíkové nanotrubičky, zkráceně CNT, vychází z anglického spojení carbon nanotubes. CNT jsou podlouhlé útvary tvořené jednou či více vrstvami grafenu, které jsou srolované a vytváří tak trubičku. Tyto trubičky vykazují výjimečné mechanické vlastnosti, a to zejména vysokou pevnost, tuhost a modul pružnosti. Díky tomuto širokému spektru výborných vlastností jsou možnosti jejich využití rozsáhlé. Kromě stavebnictví nachází uplatnění i při výrobě určitých částí letadel, vesmírných raket, hi – tech materiálů či v medicíně. [9]

2.1 Uhlík

Uhlík patří mezi nejrozšířenější chemické prvky na Zemi. Byl znám už od dávných let v podobě dřevěného uhlí či sazí. Již ve starém Egyptě saze používali na výrobu inkoustu. Jako chemický prvek, byl však rozpoznán až v 18. století. Uhlík je kovový prvek, který se v přírodě vyskytuje ve třech základních alotropických modifikacích. Tyto modifikace se vyznačují odlišnými vlastnostmi, i když se jedná stále o minerály tvořené uhlíkem. První z nich, a zároveň nejměkčí z modifikací, je grafit neboli tuha. Na Mohsově stupnici tvrdosti zaujímá grafit stupeň 1–2. Další modifikací je naopak dle Mohse nejtvrdší přírodní materiál a tím je diamant. Vysoké tvrdosti dosahuje díky zvláštnímu uspořádání atomů uhlíků v krystalické mřížce. Ve světě není mnoho materiálů, které by se svou tvrdostí diamantu vyrovnaly. Třetí, dá se říct i nejnovější modifikací jsou fullereny. Strukturálně jsou fullereny tvořeny pouze z atomů uhlíku,

vytvářejících souměrnou kouli. Nejrozšířenějším a nejstabilnějším fullerénem je C₆₀, který má stejné uspořádání jako švy na fotbalovém míči. Průměr fullerenu C₆₀ je zhruba 1 nm. Fullerény vznikají při zahřátí grafitu na vysoké teploty. Jedná se tedy o uměle vyrobenou látku. Z fullerénů se pak dále vyrábí uhlíkové nanotrubičky. Dalšími modifikacemi uhlíku jsou již zmíněné uhlíkové nanotrubičky nebo grafen, který je tvořen jednovrstvou krystalickou mřížkou ze šestiúhelníků, v jejichž vrcholech jsou atomy uhlíku. Tvarem tedy připomíná včelí plástev. [10] [11] [12]



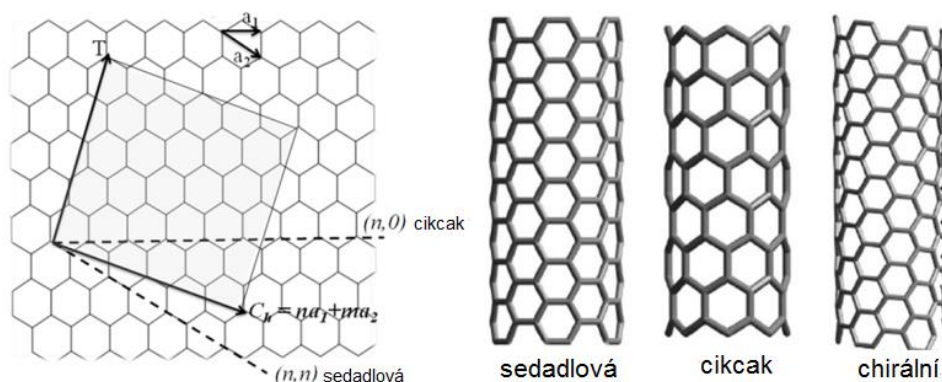
Obrázek 2 – Krystalické mřížky modifikací uhlíku [13]

2.2 Historie CNT

Již v roce 1978 Morinobu Endo z Francie zaznamenal výskyt uhlíkových nanotrubiček. Tyto uhlíkové trubičky však nebyly čisté, a tudíž nevykazovaly žádné zvláštní vlastnosti, které by stály za povšimnutí. Za prvního objevitele je tedy považován až japonský fyzik Sumia Iijima, který v roce 1991 díky metodě obloukového výboje objevuje první CNT. Jednalo se o objev trubiček složených z více vrstev grafenu, srolovaného do válce. Tento typ CNT je označován jako MWCNT (Multi – walled Carbon Nanotubes). Tyto trubičky jsou na obou koncích uzavřené polovinou fullerenu a jejich vnější průměr se pohybuje v rozmezí od 3 do 30 nm. Po dalším zkoumání CNT Sumia Iijima roku 1993 objevuje další typ trubiček a tím jsou SWCNT (Single – walled Carbon Nanotubes). SWCNT jsou na rozdíl od MWCNT tvořeny pouze jednou vrstvou srolovaného grafenu. Jsou mnohonásobně tenčí, jejich vnější průměr je od 1 do 3 nm. Již brzy po jejich objevení byly zaznamenány jejich výjimečné vlastnosti, a to vedlo ke zvýšení zájmu o výzkum CNT. Dalším typem CNT jsou DWCNT (Double – walled Carbon Nanotubes). Jedná se o nejjednodušší typ MWCNT. [14]

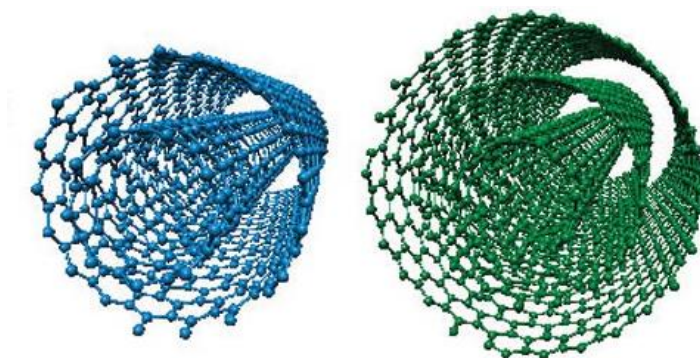
2.3 Struktura uhlíkových nanotrubiček

Uhlíkové nanotrubičky jsou tvořeny jednotlivými listy grafenu, které jsou srolovány do válce. Tento válec může být buďto uzavřený, nebo otevřený. Při uzavřené struktuře CNT je válec uzavřen polovinou fullerenu. Jedním typem struktury CNT jsou SWCNT, které jsou tvořeny jedním listem grafenu šestiúhelníkové struktury. Směr, kterým je list grafenu srolován, je dán chirálním vektorem $\vec{C}$ (n,m). Podle hodnoty čísel (n,m) lze rozeznat tři typy konstrukce SWCNT. První z nich se nazývá „cikcak“ při (n,0). Druhá struktura, kde n=m se nazývá sedadlová. Třetí, nestandardní, typ konstrukce SWCNT se nazývá chirální a vychází z nerovnice $n > m > 0$. Chirální vektor a s ním spojená chiralita ovlivňuje vlastnosti jednotlivých CNT. Průměr SWCNT se pohybuje v rozmezí od 1 do 3 nm. [15] [16]



Obrázek 3 – Typy konstrukcí SWCNT [16]

Dalším strukturálním typem CNT jsou MWCNT. Tyto nanotrubičky jsou na rozdíl od SWCNT tvořeny dvěma a více vrstvami srolovaného listu grafenu, kdy jednotlivé vrstvy jsou od sebe vzdálené 0,34 nm, stejně jako je tomu u grafitu. Průměr MWCNT se pohybuje od 3 do 30 nm. Oproti SWCNT vykazují nižší pevnosti. Poddruhem MWCNT jsou DWCNT, které jsou složeny pouze ze dvou vrstev srolovaného grafenu. Tyto trubičky se vyznačují vyššími pevnostmi než SWCNT. [15] [16]



Obrázek 4 – DWCNT a MWCNT [17]

2.4 Vlastnosti uhlíkových nanotrubiček

Uhlíkové nanotrubičky vykazují mimořádné materiálové vlastnosti i při velice nízké hustotě 1,3 až 1,4 g·cm⁻³. A to zejména vysokou pevnost a tuhost při současně vysoké flexibilitě. Díky těmto vlastnostem lze považovat CNT za novou generaci vysoce výkonných materiálů. Mezi další vlastnosti CNT patří elektrická a tepelná vodivost.

2.4.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti CNT se odvíjí od jedné z nejsilnějších vazeb v přírodě, a to kovalentní vazby C-C. Youngův modul pružnosti byl u CNT stanoven na průměrnou hodnotu 1 TPa, avšak výsledky některých experimentálních metod měření udávají hodnoty až 1,22 – 1,26 TPa. Ve srovnání modulu pružnosti CNT a například oceli, 210 GPa, vykazují CNT až 5x vyšší hodnotu. Pevnost v tahu může činit až 63 GPa, to je padesátinásobek pevnosti v tahu oceli. [18]

Youngův modul pružnosti SWCNT dosahuje průměrně hodnot 1 TPa, při maximálním prodloužení trubičky pouze o 6 % oproti předpokládanému protažení 20 %. V roce 2008 byla experimentálně stanovena pevnost SWCNT více jak 100 GPa. U víceštěnných nanotrubic je modul pružnosti nižší, 0,3 až 1 TPa. Zvýšení pevnosti MWCNT lze dosáhnout použitím vysokoenergetického ozáření elektronů až na 60 GPa. Na rozdíl od SWCNT jsou deformace MWCNT vratné, a to díky prostoru mezi jednotlivými trubičkami. Dále bylo zjištěno, že velikosti Youngova modulu není přímo závislá na průměru trubičky, nýbrž na množství defektů v jednotlivých stěnách trubiček. SWCNT jsou výrazně tenčí než MWCNT a dosahují vyšších hodnot modulu pružnosti. [9] [18] [19] [20]

Tabulka 1 – Porovnání mechanických vlastností vybraných materiálů [20]

Materiál	Youngův modul [TPa]	Pevnost v tahu [GPa]	Prodloužení při porušení [%]
SWCNT ^E	≈1 (od 1 do 5)	13–53	16
Sedadlová SWCNT ^T	0,94	126,2	23,1
Cikcak SWCNT ^T	0,94	94,5	15,6–17,5
Chirální SWCNT	0,92	–	–
MWCNT ^E	0,2–0,8–0,95	11–63–150	–
Nerezová ocel ^E	0,186–0,214	0,38–155	15–50
Kevlar - 29&149 ^E	0,06–0,18	3,6–3,8	≈2

Poznámka: E – experimentální stanovení, T – teoretické stanovení

2.4.2 Elektrické vlastnosti

Uhlíkové nanotrubičky jsou považovány za vysoce vodivý materiál. Jejich vodivost je ovlivněna například chiralitou či stupněm zkroucení listu grafenu. V závislosti na chiralitě, asymetrii, vykazují CNT vodičové i polovodičové vlastnosti. CNT se sedadlovou strukturou se chovají jako vodič, zbylé jsou polovodiče. SWCNT jsou označovány za nejvíce vodivá uhlíková vlákna s elektrickou vodivostí 10^5 až $10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ a mohou přenést hustotu elektrického proudu až $4\cdot 10^9 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$. Elektrický odpor SWCNT je řádově $10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$. Stanovit elektrickou vodivost u MWCNT je poměrně složité, a to zejména kvůli nerovnoměrně rozdělovacímu se proudu přes jednotlivé vrstvy. Elektrická vodivost jednotlivých MWCNT byla stanovena v závislosti na helicitě vnějších plášťů, nebo přítomnosti defektů a dosahuje hodnot v rozmezí 20 až $2\cdot 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. [21] [22]

pozn. helicity = vzdálenost

2.4.3 Tepelné vlastnosti

Uhlíkové nanotrubičky jsou ve vakuu stabilní do teploty 2800°C , na vzduchu je to pouze do teploty 750°C . Experimentální pokusy ukazují, že tepelná vodivost SWCNT ve směru kolmém k ose trubičky, při pokojové teplotě, činí $1,52 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Ve směru osy při pokojové teplotě dosahuje hodnoty tepelné vodivosti přibližně $3500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. V porovnání s tepelnou vodivostí mědi, $385 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, SWCNT jsou tedy skoro $10\times$ lepším tepelným vodičem. Teoreticky jsou však očekávány mnohem vyšší hodnoty, až $6600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Při experimentálním zkoušení MWCNT bylo dosaženo hodnoty tepelné vodivosti přibližně $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. [21] [22]

2.4.4 Toxicita uhlíkových nanotrubiček

S rychlým vývojem nanotechnologií budou lidé častěji vystaveni účinkům nanočástic, které mohou do organismu prostupovat skrz kůži, inhalací či přímým požitím. Extrémně malá velikost, tvar vláken, velký měrný povrch a unikátní povrchová úprava určují charakteristické chemické a fyzikální vlastnosti CNT a zvyšují jejich potenciální nebezpečí pro lidi. Jejich vliv na lidské zdraví však není plně vysvětlen. Při experimentálních stanoveních nanotoxicity CNT byly zaznamenány protichůdné výsledky, z důvodu použití různých typů CNT a metod zkoušení. Stanovení standardizovaných a spolehlivých metod pro hodnocení toxicity CNT je tedy základem pro přesné a reprodukovatelné měření toxicity. Základními mechanismy toxicity CNT je oxidační stres, zánětlivé reakce, maligní transformace, poškození a mutace DNA, tvorby granulomů a intersticiální fibróza. Srovnávací studie toxicity ukázaly, že SWCNT jsou toxičtější než křemen, který je při dlouhodobé inhalaci velice zdraví škodlivý. CNT jsou svým jehlicovitým tvarem podobné azbestovým vláknům. To vyvolává myšlenku, že rozšířené používání uhlíkových nanotrubiček může vést k rakovině plic. [23] [24]

Největší nebezpečí uvolnění nanočástic do okolí je v době jejich výroby a na konci životnosti konstrukce z materiálu s nanočásticemi. Uvolnění během provozního života konstrukce je také možné, zejména v závislosti na charakteru používání, vystavení konstrukce povětrnostem a abrazivním účinkům. [25]

Díky rozmanitosti vlastností CNT je obtížné vyhodnocovat jejich toxicitu. Ta může být ovlivněna povrchovým napětím, tvarem, délkou, průměrem, aglomerací a čistotou. [23]

2.4.4.1 Vliv čistoty CNT na toxicitu

Mnoho výzkumů dokazuje, že jedním z nejzásadnějších faktorů ovlivňujících toxicitu je čistota CNT. Z výzkumu Ying Liu a Yuliang Zhao vyplývá, že mnohdy právě nečistoty jsou nositelem toxicity, nikoli samotné CNT. Nečistoty, zejména látky z kovových katalyzátorů, se do CNT zavádějí v největším množství během jejich výroby. Například při výrobě CNT technikou chemického vylučování par je kontaminace zbytky katalyzátoru nevyhnutelná. Pro odstranění nečistot je využíváno různých metod čištění, avšak není plně možné kovové nečistoty z CNT odstranit, aniž by nedocházelo ke zničení strukturální integrity CNT. Komerčně vyráběné SWCNT a MWCNT s vysokým obsahem Fe, Co, Mo a Ni a stejně tak kyselinou čištěné SWCNT snadno překračují buněčnou membránu. Například obsah niklu, či železa v SWCNT může negativně ovlivnit vlastnosti peptidu L – Glutathion, který je silným antioxidantem a chrání buňky před oxidačním stresem. Oxidační stres se dá vysvětlit jako nerovnováha mezi tvorbou reaktivního kyslíku, který vzniká jako vedlejší produkt okysličování a látkové výměny, a schopností organismu odbourávat reaktivní meziprodukty a tím organismus detoxikovat. Lam a jeho kolektiv také poukazují na vliv CNT obsahujících různé typy a množství kovů, na zvýšený vznik zánětlivých lézí a vést k vyšší úmrtnosti. [23] [24] [26]

2.4.4.2 Vliv chemických a strukturálních vlastností CNT na toxicitu

CNT jsou jedno či více vrstvé struktury. Pro lékařské aplikace je primárním cílem využívat co nejčistší CNT. Čisté CNT jsou chemicky inertní a nerozpustné ve vodném prostředí. Vzhledem k vysoké hydrofobicitě jsou škodlivé pro živé buňky v organismu. Aby došlo ke snížení hydrofobicity, jsou CNT oxidovány silnou kyselinou za vzniku hydroxylových a karboxylových skupin na koncích nanotrubiček. Tyto skupiny mohou být dále účinně využity pro připojení specifických biomolekul, pomocí kovalentní vazby, k CNT. Takto upravené CNT jsou pak využívány pro terapeutické účely jako nosič medikací. Například hydroxylované SWCNT se velice rychle šíří po celém těle a následně dochází k jejich akumulaci v kostech, kovalentně funkcionalizované MWCNT se akumuluje v játrech. [23] [24]

2.4.4.3 Vliv tvaru CNT na toxicitu

CNT mají tenký a podlouhlý tvar. Díky tomu lze definovat dle Světové zdravotnické organizace jako vlákna, tedy částice s poměrem stran, délka ku průměru, větší než tři.

Jejich toxické vlastnosti mohou být obdobné jako u jiných vláknitých částic, jako je například azbest. Vědci také upozornili na podobnost chování uhlíkových nanotrubiček, zavedených do břišní dutiny, a azbestových vláken. Je tedy potřeba dále se věnovat výzkumu vlivu tvaru CNT na toxicitu. [23] [24]

2.4.4.4 Vliv délky CNT na toxicitu

Různě dlouhé uhlíkové nanotrubičky vyvolávají různé stupně toxicity. Se vzrůstající délkou vzrůstá i toxicita. Stupeň zánětu indukovaný při dávce 825 nm dlouhých CNT byl vyšší, než při dávce CNT dlouhých 220 nm. Yamashita a kolektiv uvádí, že dlouhé MWCNT způsobují velmi silné poškození DNA a tvorbu granulomů. [23] [24]

2.4.4.5 Vliv aglomerace CNT na toxicitu

Agregační stav může ovlivnit tvar a plochu CNT a je jedním ze základních faktorů při určování toxického potenciálu CNT. Toxicita aglomerovaných SWCNT je mnohonásobně vyšší než u lépe rozptýlených SWCNT. Wick a kolektiv uvádí, že rozptýlené CNT byly méně toxické než azbest, zatímco aglomeráty CNT indukovaly výraznější cytotoxicitu než azbestové vlákno ve stejných koncentracích. [23] [24]

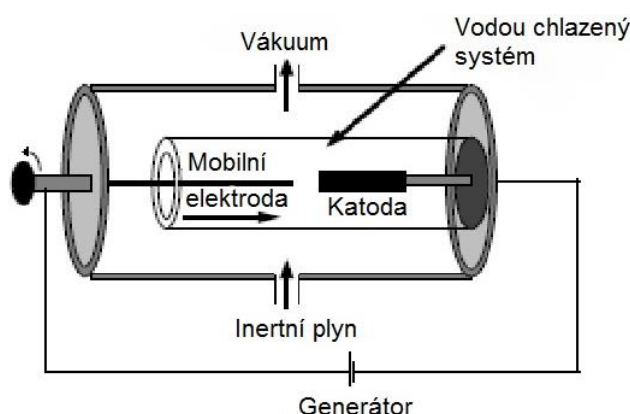
2.5 Výroba uhlíkových nanotrubiček

Vzhledem k tomu, že se uhlíkové nanotrubičky v přirozeném, čistém stavu nevyskytují ani ve vesmíru ani na Zemi, je tedy snaha objevovat různé metody jejich výroby. Výrobní metody ovlivňují vlastnosti uhlíkových nanotrubiček. Je známo již mnoho metod, podle kterých lze vyrobit uhlíkové nanotrubičky. Ty jsou dle základního dělení rozděleny na fyzikální, chemické nebo kombinované procesy. Mezi nejvýznamnější z výrobních metod patří metoda obloukového výboje, laserová ablace nebo chemická depozice z plynné fáze (CVD). Výrobní metody ovlivňují vlastnosti uhlíkových nanotrubiček.

2.5.1 Obloukový výboj

Tato technika výroby CNT je nejrozšířenější a zároveň i ta nejstarší. Touto metodou lze vyrábět i fullereny, a právě při pozorování fullerenů vyrobených obloukovým výbojem byly poprvé objeveny uhlíkové nanotrubičky. Tato metoda je založena na elektrickém obloukovém výboji mezi dvěma grafitovými elektrodami, kdy jedna je pevná a druhá pohyblivá. Tyto elektrody jsou od sebe vzdáleny přibližně 1 mm a jsou umístěny v uzavřené komoře. Uzavřený prostor okolo elektrod je vyplněn inertními plyny, jako jsou argon nebo helium, při nízkém tlaku v rozmezí 5 až 70 kPa. Dále je využíváno jednosměrného proudu o velikosti 50–100 A a napětí 20 V, který prochází elektrodami a vytváří mezi nimi plazmu o teplotě přibližně 4000 K. Díky této vysoké teplotě dochází na anodě k tavení a odpařování uhlíku, který se ve formě trubiček usadí na druhé tyči, katodě, ve formě MWCNT. Vyrobené MWCNT dosahují délek v řádech 10 μm

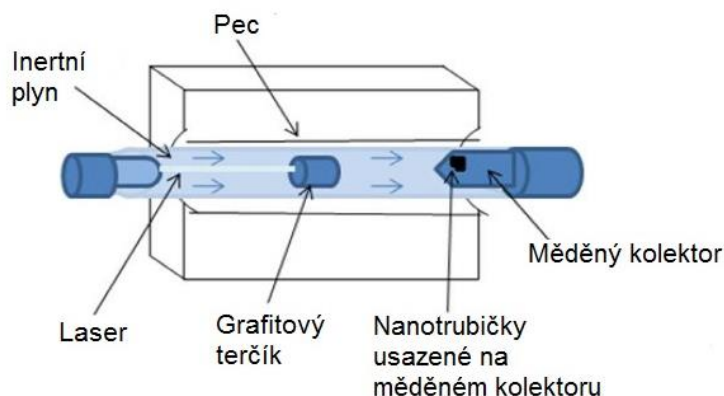
s průměrem v rozmezí 5–30 nm. Tyto nanotrubičky jsou vázány silnými Van der Waalsovými silami a vytváří svazky. Pokud chceme vyrábět SWCNT je nutné, aby anoda byla naplněna kovovým katalyzátorem. Může to být například železo, kobalt, nikl a další. Pro výrobu SWCNT je optimální použití uhlíkové anody obsahující 1 % yttria a 4,2 % niklu, tato kombinace funguje v anodě jako potřebný kovový katalyzátor. Vzniklé SWCNT se usazují na stěny komory. Po snížení teploty komory dojde k odsátí vzniklých CNT, které je však potřeba ještě vyčistit, jelikož mohou obsahovat vedlejší produkty z výroby. [27] [28]



Obrázek 5 – Schéma přístroje pro výrobu CNT obloukovým výbojem [27]

2.5.2 Laserová ablace

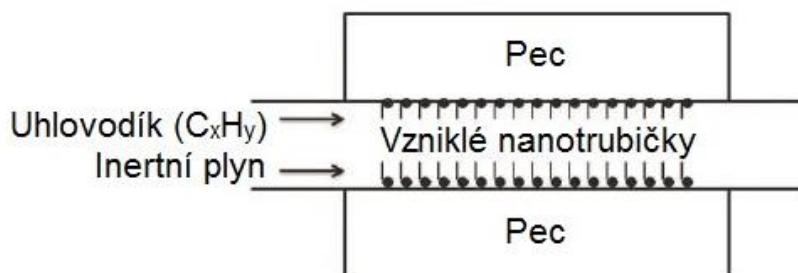
Laserová ablace je druhou nejpopulárnější a velmi výkonnou metodou na výrobu uhlíkových nanotrubiček. Při procesu laserové ablace dochází k ozařování a tím rozrušování uhlíkového terčíku. Ten je umístěn uprostřed dlouhé křemenné trubky namontované v peci. Po uzavření a utěsnění trubky se teplota v peci zvýší na 1200 °C. Do trubice je poté vháněn inertní plyn, kterým může být hélium nebo argon. Uhlík se laserovým ozařováním z grafitového terčíku odpařuje do prostoru vyplněného héliem nebo argonem. Odtud jsou CNT proudícím plynem přemísťovány z vysokoteplotní zóny pece a usazovány na kuželový, vodou chlazený, měděný kolektor. Tímto postupem vznikají MWCNT. Tyto nanotrubičky jsou tvořeny 4 až 24 vrstvami stočeného grafenu a dosahují délky do 300 nm, neobsahují žádné vady a jsou na konci uzavřené. Pokud dojde ke snížení teploty v peci na 900 °C, vyrobené trubičky obsahují více defektů. Při dalším poklesu teploty pod 200 °C dojde k přerušení výroby CNT. Pokud je záměrem vyrábět touto metodou SWCNT, je potřeba do uhlíkového terčíku přidat malé množství přechodového kovu. [27] [22]



Obrázek 6 – Schéma přístroje pro výrobu CNT pomoci laserové ablace [22]

2.5.3 Chemická depozice z plynné látky (CVD – Chemical Vapor Deposition)

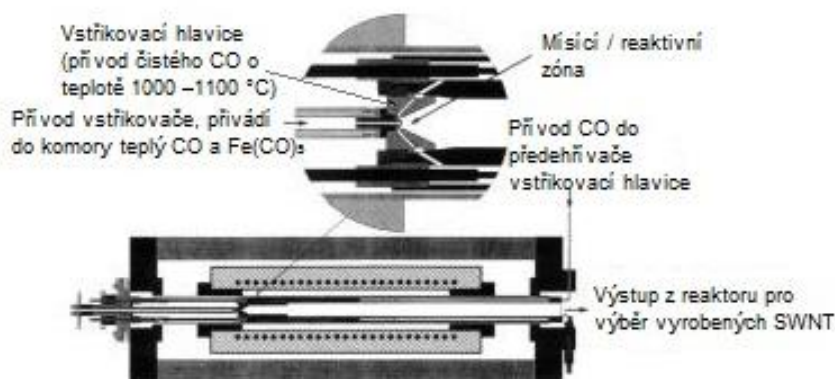
Metoda chemické depozice z plynné látky umožňuje vyrábět CNT s předem definovanými vlastnostmi. Jedná se o kontrolovatelnou, jednoduchou, širokospektrální a ekonomicky nepříliš náročnou metodu, která je díky těmto vlastnostem v současné době považována za vhodnou metodu pro výrobu CNT ve velkém množství. Metoda je založena na rozkladu plynného uhlovodíku při použití kovového katalyzátoru. Tento proces se provádí v průtokové peci při atmosférickém tlaku. Průtokové pece mohou být buďto horizontální nebo vertikální, kdy nejčastěji používanou je pec horizontální. Při tomto výrobním procesu reaguje směs plynného uhlovodíku (ethylen, methanu či acetylen) a inertního plynu (amoniaku, dusíku nebo vodíku) s kovovým katalyzátorem, který je uložen na substrátu ve vyhřívané reakční komoře průtokové pece. Jako substrát je nejčastěji využíván křemík, ale lze použít i sklo či oxid hlinitý. Katalyzátor se na substrát nanáší například fyzikálním rozprašováním, nanášením roztoku nebo odpařováním elektronového paprsku. Kovový katalyzátor (železo, nikl nebo kobalt) je zahřátý na teplotu 700 až 900 °C. Použitím metody CVD lze vytvořit několik strukturálních forem uhlíku, jako jsou vlákna amorfního uhlíku, SWCNT a MWCNT. Uhlíkové nanotrubičky se vytvářejí na povrchu katalyzátoru v důsledku rozpadu plynného uhlovodíku. Vzniklé nanotrubičky mohou být rovné, zakřivené či spirálovité. Vlastnosti vyrobených CNT jsou závislé na teplotě a tlaku v peci, typu a objemu použitého uhlovodíku. Průměr vzniklých CNT je závislý na velikosti částic katalyzátoru. [29] [30]



Obrázek 7 – Schéma přístroje pro výrobu CNT pomocí CVD

2.5.3.1 Vysokotlaká konverze oxidu uhelnatého (HiP CO – Hight pressure CO Conversion)

Princip vysokotlaké konverze oxidu uhelnatého je založen na metodě chemické depozice v plynné fázi, která je v práci také popisována. Touto metodou jsou vyráběny SWCNT o vysoké čistotě, více jak 90%, a v poměrně velkém množství. Touto metodou lze vyrobit až 450 mg CNT za hodinu. SWCNT vznikají při proudění oxidu uhelnatého, při vysokých teplotách (900 až 1100 °C) a tlacích (30 až 50 atmosfér), prostředím plynných kovových katalyzátorů. Jako katalyzátor je při této metodě využíváno železo ve formě pentakarbonylu železa ($\text{Fe}(\text{CO})_5$). $\text{Fe}(\text{CO})_5$ se při vysokých teplotách rozkládá a volné atomy železa kondenzují a vytvářejí svazky. Na těchto svazcích pak díky disproportionaci $\text{CO} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ (SWCNT) vznikají nanotrubičky. [31]



Obrázek 8 - Schéma přístroje pro výrobu CNT pomocí HiP CO [31]

3 Komerčně vyráběné CNT

V této kapitole budou porovnány vlastnosti vybraných komerčně vyráběných uhlíkových nanotrubiček.

3.1 Významní producenti CNT

3.1.1 Yurui (Shanghai) Chemical Co., Ltd

Yurui (Shanghai) Chemical Co., Ltd je dceřiná společnost firmy Ruiyuan Group. Tato firma má tři závody nacházející se v Zhejiang, Henan a Shandong. Jedná se o výzkumné centrum orientované na budoucnost. Nabízí širokou škálu produktů vysoké kvality. Jedná se zejména o různé organické sloučeniny, OLED meziprodukty a katalyzátory z ušlechtilých kovů. Uplatnění těchto výrobků se nachází v mnoha oblastech, ať už v medicíně, elektrotechnice či chemickém průmyslu. [32]

3.1.2 Nanocyl, Inc.

Firma Nanocyl, Inc. byla založena roku 2002 v Belgii a byla prvním z výrobců vícevrstvých uhlíkových nanotrubiček. Dnes už je tato firma označována jako expert na MWCNT a je lídrem v oblasti jejich vývoje, výroby a prodeje. Soustředí se především na současné výzvy energetických, dopravních a elektronických trhů a současně vyvíjí nové trvanlivé řešení pro trh s pryžovými výrobky. [33]

3.1.3 Shenzhen Nanotech Port Co. Ltd (NTP)

Shenzhen Nanotech Port Co. Ltd (NTP) je nejstarší firmou zabývající se vývojem a výrobou uhlíkových nanotrubiček. Byla založena roku 2001 v Číně. Cílem společnosti je dosáhnout industrializace nanomateriálů na bázi uhlíku, tedy zejména uhlíkových nanotrubiček. CNT mají dle firmy velký potenciál v použití v tradičních i moderních průmyslových odvětvích. V současné době mezi jejich hlavní produkty patří různé typy prášku z uhlíkových nanotrubic, kapalně disperze uhlíkových nanotrubiček, uhlíkových nanovláken, nano-krystalického grafitu a dalších nanomateriálů na bázi uhlíku. NTP může ročně vyrobit až 10 tun uhlíkových nanotrubiček a to jí řadí mezi největší výrobce CNT. [34]

3.1.4 Chasm Advanced Materials, Inc

Společnost Chasm Advanced Materials, Inc. byla založena roku 2015 se sídlem v Oklahomě. Od roku 2016 využívá ty nejmodernější technologie pro výrobu uhlíkových nanotrubiček. Firma je zaměřena na výrobu vysoce kvalitních jednovrstvých a vícevrstvých uhlíkových nanotrubiček, které jsou vyráběny patentovaným procesem

CoMoCAT™. Kromě výroby CNT a jiných nanomateriálů má firma rozsáhlé zkušenosti s výrobou široké škály nátěrů, zejména pak nátěry vytvrzované UV zářením a optické nátěry. [35]

3.1.5 NanoIntegris

NanoIntegris je americkou firmou založenou roku 2006, sídlící v Chicagu. Patří mezi přední světové producenty jednovrstvých uhlíkových nanotrubiček s výbornými elektrickými vlastnostmi. [36]

3.2 Komerčně vyráběné MWCNT

Tabulka 2 – Vlastnosti komerčně vyráběných MWCNT [37] [38] [39]

Označení	TNM7	NC 7000™	S-MWNT-1020
Typ CNT	MWCNT	MWCNT	MWCNT
Výrobce	Yurui (Shanghai) Chemical Co., Ltd	Nanocyl, Inc.	Shenzhen Nanotech Port Co. Ltd
Výroba	CVD	CCVD	CVD
Čistota [%]	> 95	90	> 97
Průměr trubičky [nm]	30–50	9,5	10–20
Délka trubičky [μm]	10–20	1,5	< 2
Měrný povrch [m ² ·g]	> 60	250–300	> 100–160
Hustota [g·cm ⁻³]	2,1	–	–
Cena [Kč·g ⁻¹]	70	nedostupná	100

3.3 Komerčně vyráběné SWCNT

Tabulka 3 – Vlastnosti komerčně vyráběných SWCNT [40] [41] [42]

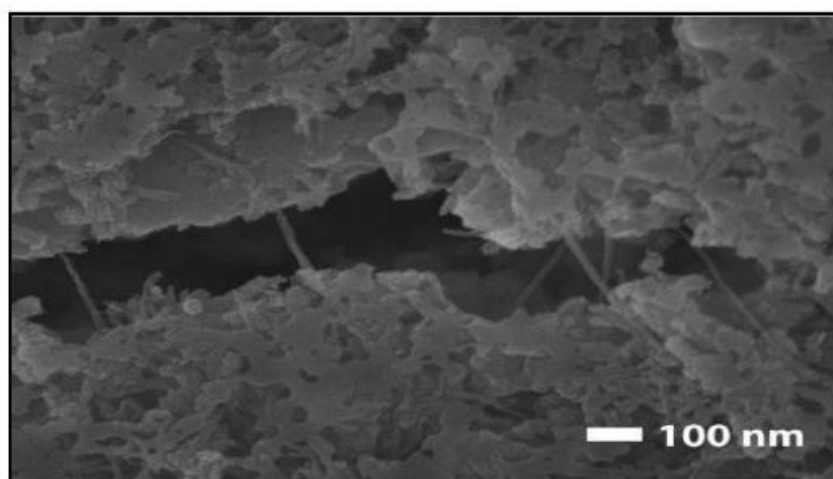
Označení	SG76	HiPCO® purified	SWNT 1
Typ CNT	SWCNT	SWCNT	SWCNT
Výrobce	Chasm Advanced Materials	NanoIntegris	Shenzhen Nanotech Port Co. Ltd
Výroba	CVD	HiPco	CVD
Čistota [%]	90	85	90
Průměr trubičky [nm]	0,7–1,1	0,8–1,2	1–2
Délka trubičky [μm]	0,3–2,3	0,1–1	> 5
Měrný povrch [m ² ·g]	> 700	400–1000	500–700
Hustota [g·cm ⁻³]	–	1,6	2,1
Cena [Kč·g ⁻¹]	25 500	19 600	12 500

4 Cementové kompozity s CNT

Cementový kompozit, beton, je tvořen základní kombinací směsi hrubého a drobného kameniva, příměsí, cementu a vody. Jeho mechanické vlastnosti jsou do značné míry závislé na jednotlivých vlastnostech použitých surovin. Betonové materiály vykazují rostoucí tendenci ke křehkému způsobu porušení. Vznik mikrotrhlin má velký dopad na trvanlivost cementové matrice. Tyto mikrotrhliny pak urychlují degradaci kompozitů vlivem zmrazování a rozmrazování, působením chloridů a dalších mechanismů. Jednou z možností, jak zabránit tvorbě těchto trhlin, je použití různých druhů vláken, jako rozptýlené výztuže. Kromě běžně používaných typů vláken (ocelová, polypropylenová, skleněná) mohou být použity i uhlíkové nanotrubičky. Jejich mechanické vlastnosti jsou mnohonásobně lepší než u jiných nanovláken.

Použití uhlíkových nanotrubiček má v cementových kompozitech hned několik výhod. První z nich je, že díky svým mechanickým vlastnostem, které přenášejí do kompozitu, zlepšují jeho mechanické chování. Zvyšují zejména tahovou a tlakovou pevnost kompozitů. V posledních letech výzkumy ukazují, že použitím MWCNT jako rozptýlené výztuže, lze zvýšit pevnost v tahu i tlaku od 10 do 25 %.

Druhou výhodou je jejich extrémní štíhlost, díky které je potřeba k vytvoření mikrotrhlin větší množství energie, než by bylo potřeba pro vznik trhlin s využitím vláken s nižším poměrem stran. Tímto snižují množství vznikajících trhlin. V cementových kompozitech vyztužených uhlíkovými nanočásticemi byla také pozorována přemostění již vzniklých trhlin, kdy samotné CNT zaručují přenos zatížení přes prázdné prostory trhliny. Toto chování vede ke zvýšení odolnosti vůči vzniku trhlin a tím se zvyšuje trvanlivost těchto kompozitů. [43]

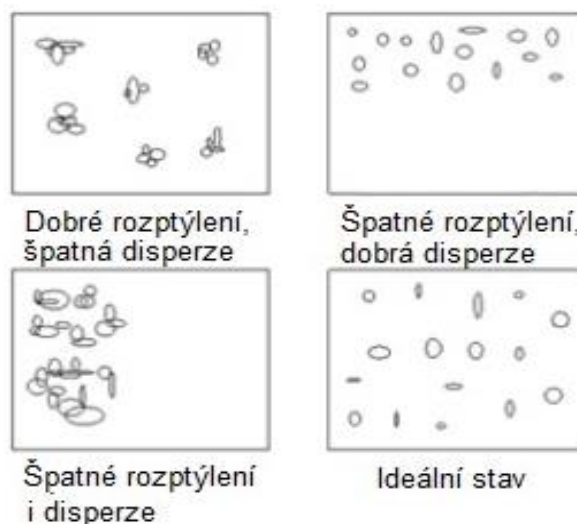


Obrázek 9 – Přemostění trhliny uhlíkovými nanotrubičkami [43]

Za třetí, CNT díky svému malému průměru, blížícímu se velikosti C–S–H produktů z hydratace cementu, mohou být lépe rozptýlené v cementové matrici a díky menším

rozestupům mezi jednotlivými vlákny s matricí lépe spolupůsobí. Dále bylo zjištěno, že CNT mají pozitivní vliv na hydratační procesy cementu. Nedávná studie poukazuje na schopnost uhlíkových nanotrubiček působit jako nukleační činidlo pro vznik C–S–H produktů, které se přednostně vytvářejí na povrchu nanotrubičky, na rozdíl od povrchu nezhydratovaných cementových zrn. Výsledkem je hustá formace C–S–H, která je pevně spojena s CNT a díky tomu dochází k výztužnému chování kompozitů.

Potenciál použití CNT jako rozptýlené výztuže pro cementové materiály nebyl zatím plně využit, hlavně díky potížím při zakomponování CNT. Hlavním problémem je komplikovaná dispergace CNT, během níž mají tendenci se shlukovat. Pokud nejsou nanotrubičky dokonale rozptýlené, vznikají v matrici nanokompozitu defektní místa, které omezují účinnost CNT a jsou v nich iniciovány prvotní porušení matrice. [3] [43] [44]



Obrázek 10 – Rozptýlení CNT v cementovém kompozitu [9]

4.1 Výzkum užití CNT v cementových kompozitech

Výzkum cementových kompozitů vyztužených CNT byl zahájen již počátkem 90. let 20. století. Vědci Chen a Chung v roce 1993 zaznamenali nárůst pevností cementových kompozitů s krátkými uhlíkovými vlákny v ohybu o 85 % a v tlaku o 22 %. Další významné výsledky byly zjištěny v roce 2004, kdy Li zjistil, že pevnost v tlaku a tahu za ohybu u cementových malt s CNT byla vyšší než u nevyztužené cementové malty. O rok později Li přichází se studií, ve které poukazuje na snížení pórovitosti cementové malty po přidání CNT. Tentýž rok Makar a jeho kolektiv vědců zjistili, že lze přidáním SWCNT urychlit hydrataci cementu. Makar spolu s Chanem podrobně vysvětlili proces hydratace cementu vyztuženého uhlíkovými nanotrubičkami. Bylo zjištěno, že přítomnost CNT ovlivňuje morfologii hydratačních produktů. Ovlivňují jak počáteční stavy hydratace, kdy dochází k hydrataci trikalciumaluminátu $(\text{CaO})_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,

tak pomalu hydratující dikalciumsilikát $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$. Dále bylo zjištěno, že CNT urychlují hydrataci tím, že působí jako matrice pro vývoj C–S–H a $\text{Ca}(\text{OH})_2$, vznikajících během hydratace. CNT působí jako nukleační činidlo tím, že poskytují více prostoru pro hydrataci a podporují tvorbu hydratačních produktů. V roce 2009 Agullo a kolektiv zaznamenali zvýšení pevností v tlaku v ranném věku zkoušených vzorků, po přidání malého množství MWCNT do cementového kompozitu. Zároveň bylo zjištěno, že při stanovení 28denních pevnostech v tlaku u cementových malt s MWCNT se výsledné hodnoty výrazně nelišily od pevností v tlaku nevyztužené cementové malty. Manzur a Yazdani v roce 2010 zaznamenali nárůst pevností v tlaku cementové malty po přidání dvou různých velikostí neošetřených MWCNT. Han a kolektiv v roce 2013 přišli s tvrzením, že přidáním MWCNT do cementových kompozitů dochází ke snížení propustnosti vody a koeficientu propustnosti. Manzur s kolektivem v roce 2014 zjistili, že MWCNT s vnějším průměrem 20 nm nebo menším dosahují v cementových maltách vyšších pevností než MWCNT s větším vnějším průměrem. Toto chování je způsobeno tím, že menší MWCNT mohou být vyráběny v jemnějším měřítku, což zajišťuje účinnější vyplnění nanopórů v cementové matrici. Zároveň se s menší velikostí CNT zvyšuje výkonnost nanotrubiček jako nukleačního činidla během hydratace cementu a tím podporuje vyšší tvorbu C–S–H fáze. Lelusz v roce 2014 zjistil, že pevnost v tlaku u cementových kompozitů klesá při zvyšování dávky MWCNT. [45]

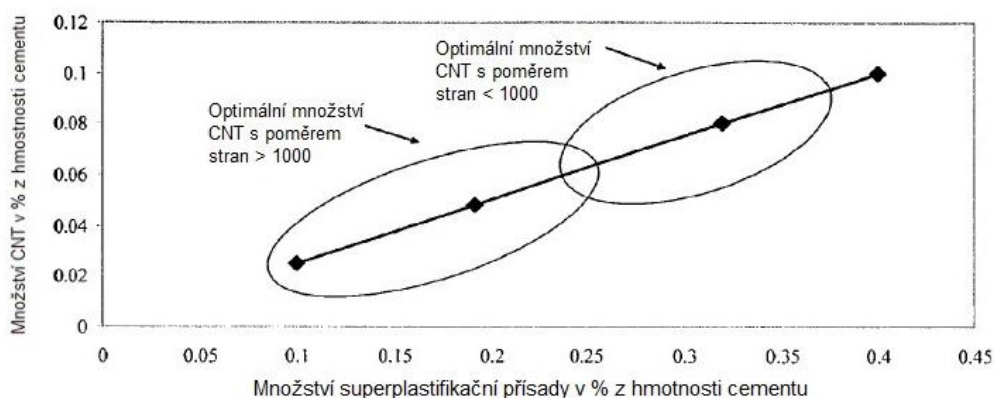
4.1.1 Optimální dávkování uhlíkových nanotrubiček do cementových malt

Dle studie Tanvir Manzur and Nur Yazdani z roku 2015 byla stanovena optimální směs pro výrobu cementových malt vyztužených uhlíkovými nanotrubičkami. Na výrobu zkušebních vzorků byl použit portlandský směsný cement, speciální tříděný písek, komerčně dostupné povrchově upravené MWCNT v práškové formě s vnějším průměrem 10–20 nm. Jako povrchově aktivní látka při dispergaci byla použita superplastifikační přísada ADVA Cast 575, na bázi polykarboxylátu.

Zde jsou uvedeny některé závěry vyplývající z této studie.

- Cementové kompozity vyztužené MWCNT vykazují lepší pevnosti tahu za ohybu a tlaku oproti nevyztuženým kompozitům.
- Použití superplastifikační přísady jako povrchově aktivní látky činí disperzi MWCNT ve vodném roztoku stabilnější a pozitivně ovlivňuje i pevnosti výsledných kompozitů.
- Pevnost cementových kompozitů s MWCNT je závislá na vodním součiniteli, tedy poměru množství vody ku množství cementu. Při vodním součiniteli 0,5 jsou pevnosti výrazně nižší než při vodním součiniteli v rozmezí 0,6 až 0,65.
- Dávka 0,1 až 0,3 % MWCNT vykazuje výrazné nárůsty pevností oproti referenčním vzorkům. Po 3, 7 a 28 dnech byl pozorován nárůst o 22,5, 23,5 a 15 %.

- Dávka 0,1 % MWCNT vykazuje navýšení pevností cementových kompozitů v tahu za ohybu. Po 3, 7 a 28 dnech byl pozorován nárůst o 24,0, 24,0 a 19,5 %. [46]



Obrázek 11 – Optimální množství MWCNT a superplastifikačních přísad podle poměru stran CNT pro vyztužení v materiálech na bázi cementu [44]

4.2 Použití cementových kompozitů s CNT

Cementový nanokopozitní materiál je možné využít pro širokou škálu uplatnění. Ať už se jedná o použití na speciálních aplikacích, jako jsou dálniční či mostní konstrukce či přistávací dráhy pro letadla. Zároveň ho lze použít i ve všech aplikacích běžného či vysokopevnostního betonu. [44]

Běžný beton není citlivý vůči provoznímu zatížení z důvodu jeho nízké elektrické vodivosti. Tento nedostatek lze překonat přidáním uhlíkových nanotrubiček, které mají naopak elektrickou vodivost vysokou a to 10^2 až $10^4 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Při tlakovém namáhání se zvýší počet kontaktních míst mezi nanotrubičkami a tím se sníží odpor materiálu. To pak přinese betonu citlivost na napětí, které pak umožní sledování namáhání pomocí měření změn elektrického odporu. Tato vlastnost cementových kompozitů vyztužených uhlíkovými nanotrubičkami může být využívána ke sledování průběhu běžných napětí po dobu celé životnosti konstrukce, ale zároveň i možnost sledovat chování konstrukce při mimořádných událostech, jako je seismická činnost, otřesy a výbuchy, které vytvářejí plastické deformace. Experimentální výsledky ukazují, že samosnímatelné cementové kompozity s CNT vykazují citlivé a stabilní reakce na opakované tlakové zatížení a impulsní zatížení, jako například zatížení od projíždějících vozidel. Díky těmto poznatkům je zřejmý velký potenciál cementových kompozitů s CNT v použití na silniční kryty, kdy bude možno díky jejich vlastnostem sledovat dopravní provoz. [47]

4.3 Dispergace uhlíkových nanotrubiček

Využití uhlíkových nanočástic v cementových kompozitech je obzvláště slibnou metodou zlepšování vlastností kompozitů. Největším problémem pro jejich použití a manipulaci s nimi je jejich neustálá snaha se shlukovat díky vysokému měrnému povrchu a silným Van der Waalsovým silám. Proto je důležité CNT správně dispergovat. Existují tři základní způsoby dispergování, které se běžně používají. První z nich je mechanické míchání, které může být prováděno například vysokorychlostním mícháním ve vodním prostředí, hydrokavitací či společným mletím pomocí kulového mlýna. Mechanické rozptylování je vhodné pro dispergaci CNT v kovových nebo keramických kompozitech. Druhým způsobem je použití povrchově aktivních látek. Tato metoda je využívána zejména při výrobě polymerních kompozitů, kdy mohou být CNT dispergovány ve vhodně zvoleném vodném prostředí v kombinaci s povrchově aktivní látkou pro výrobu kompozitu. Tento typ dispergace však není vhodný pro cementové kompozity. Rozpouštědla běžně používající se pro polymerní kompozity mohou mít nepříznivý vliv na hydratační vlastnosti cementu. Jako jedna z možností dispergace CNT v cementu bylo zvoleno použití běžně přidávaných přísad jako dispergačního činidla. Třetí možnost, jak rozptýlit CNT, je použití ultrazvukových metod. Dalším řešením účinné dispergace je vhodná kombinace těchto metod. Na základě výsledků experimentů zaměřených na ověření výše uvedených metod, byla pro dispergaci CNT v cementových kompozitech vybrána jako nejvhodnější metoda kombinující ultrazvukovou kavitaci a vhodnou povrchově aktivní látku. [44] [48] [49]

V oblasti zakomponování produktů nanotechnologií do cementových kompozitů dosavadní studie ukazují na fakt, že nelze dosáhnout rovnoměrné disperze CNT ani při použití povrchově aktivních látek v důsledku vysoké alkality kompozitů na cementové bázi. [50]

4.3.1 Povrchově aktivní látky

V praxi se pro dispergaci CNT využívá ultrazvukové energie a přídavek surfaktantů, tedy povrchově aktivních látek k vodným roztokům s CNT. Povrchově aktivní látky pomáhají rozptýlit CNT v celé cementové matici. Vhodnými a zároveň dostupnými povrchově aktivními látkami jsou superplastifikační přísady, zejména polykarboxyláty a polykarboxylétery. Tyto látky se přidávají ve vhodném poměru k množství CNT, v rozmezí od 1,5 do 8,0 (CNT : povrchově aktivní látka). Dosavadní výzkumy ukazují, že MWCNT lze úspěšně dispergovat v polykarboxylátech nebo roztoku kyseliny polyakrylové. Pro dispergaci SWCNT jsou využívány naftalensulfonáty. [44]

4.3.2 Ultrazvukové rozptylování uhlíkových nanotrubiček

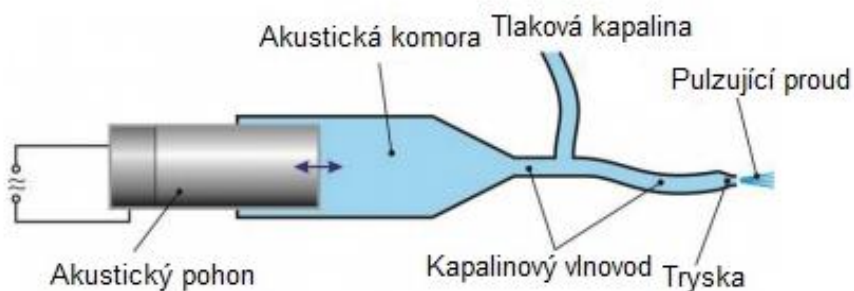
Využití ultrazvukové energie je pro dispergaci CNT velmi slibné. CNT je možné dispergovat ve vodě, oleji či polymerech. V laboratorních podmínkách se dispergace dosahuje pomocí ultrazvukové lázně nebo pomocí ultrazvukové sondy, známé jako sonikátor. Použití ultrazvukové sondy se tedy nazývá sonikace a je to nejčastěji používaná metoda. Ultrazvukem lze CNT dispergovat jak při nízkých, tak vysokých koncentracích. Díky ultrazvukovým vlnám o vysoké intenzitě dochází v kapalině ke vzniku kavitace. Při tomto ději dochází ke vzniku mikrobublinek za poklesu tlaku a následně k jejich implozi. Imploze je opakem exploze. Je to jev, při kterém se bublinka zborťí sama do sebe za vysokého tlaku a teplotě. Následně pak toky kapalných proudů, které jsou výsledkem kavitace, překonávají povrchové síly mezi nanotrubičkami a oddělují je. Sonikační energie má tedy dva účinky na dispergaci nanotrubiček. Těmi jsou mechanické oddělování shluků nanotrubiček a zároveň rozbíjení jednotlivých trubiček tak, aby byl jejich poměr stran co nejmenší. Na základě výsledků Yanga a jeho kolektivu lze usoudit, že zatímco při nižších energiích sonikace nejsou CNT důkladně rozdispergovány, při použití vyšších energií dochází k jejich rozbíjení a tím pádem snižování schopnosti přenášet zatížení. Je tedy zřejmé, že pokud je působení ultrazvuku příliš intenzivní nebo příliš dlouhé může v extrémních případech dojít až k úplné destrukci CNT. [48] [50] [51] [49]



Obrázek 12 – Ultrazvuková sonda BANDELI SONOPULS [52]

4.3.3 Metoda generování tlakové pulsace ve vysokotlakém systému vodního prostředí

Novinkou dispergace CNT ve vodním prostředí je metoda generování tlakové pulsace ve vysokotlakém systému. Metoda je založena na generování akustických vln, působením akustického pohonu na tlakovou kapalinu a následným přenosem vln vysokotlakým systémem do trysky. Pro efektivní přenos pulsační energie od generátoru k trysce se využívá stlačitelnosti kapaliny a naladění celé akustické soustavy. Oproti standartní metodě dispergace CNT pomocí sonikace, kde může docházet k nežádoucím destrukcím CNT, je použití akustického generátoru pulzační trysky k dispergování velice vhodné. CNT přidané do vody, která je natlakovaná a přivedená do akustického generátoru pulzujícího paprsku, jsou vystaveny vysokofrekvenčním tlakovým pulsacím, kavitaci a působení nárazového tlaku. Účinnost pulsace je závislá na správně navrženém vlnovodu pro danou kapalinu. Úroveň tlakové pulsace lze korigovat nastavením amplitudy vibrací, laděním generátoru a tlakem kapaliny. Díky tomu lze CNT velice účinně dispergovat a zároveň je nepoškodovat. [49]



Obrázek 13 – Schéma akustického generátoru pulzujícího paprsku [49]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 Cíl

Cílem praktické části bakalářské práce je stanovit závislost dávkovaného množství uhlíkových nanotrubiček na fyzikálně-mechanické vlastnosti cementových malt. V rámci tohoto experimentu budou vytvořeny zkušební vzorky cementové malty s různými dávkami uhlíkových nanotrubiček a vzorky bez uhlíkových nanotrubiček, sloužící jako vzorky referenční. Další kroky budou probíhat dle ČSN EN 196-1 – Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti.

6 Použité suroviny a zařízení

6.1 Použité suroviny

Jako pojivo byl použit balený portlandský cement CEM I 42,5 R od společnosti Českomoravský cement, a.s. ze závodu Mokrá. Tento cement se vyznačuje vysokým nárůstem pevností i hydratačního tepla. Po 7 dnech vykazuje průměrné pevnosti v tlaku 51 MPa a hydratační teplo $310 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$. Další parametry jsou uvedeny v technickém listu na straně 50.

Jako plnivo byl použit normalizovaný, křemičitý písek CEN EN 196 - 1, používaný pro výrobu normové malty.

Dále byla pro zlepšení konzistence čerstvé malty a ke stabilizaci rozmíchaných CNT použita superplastifikační přísada COATEX ETHACRYL HF S.C. 40 %. Tato přísada je na bázi polykarboxylát etheru. Parametry superplastifikační přísady jsou uvedeny v technickém listu, v přílohách této práce.

Voda byla použita demineralizovaná.

Použité uhlíkové nanotrubičky TNM7 od výrobce Yurui Chemical Co., LTD, Shanghai. Jedná se o CNT s vnitřním průměrem 5–12 nm, vnějším průměrem 30–50 nm a délkou 10–20 μm . Tyto nanotrubičky byly vyrobeny chemickou depozicí z plnynné fáze (CVD).

6.2 Použité zařízení

Analytické váhy s přesností 0,0001 g, laboratorní váhy s přesností 0,01 g, ultrazvukový kavitátor Bandelin Sonoplus, rozetová nádoba, magnetické míchadlo, kádinky, laboratorní míchačka nastavena dle normy ČSN EN 196 – 1, vibrační stůl nastaven dle norem ČSN EN 196 – 1 a ČSN EN 459 – 2, normové formy o rozměrech 40×40×160 mm.

7 Receptury

Pro tento experiment bylo zvoleno 5 receptur. Pro výrobu referenčních vzorků byla zvolena receptura normové malty s přidavkem superplastifikační přísady, 0,2 % z hmotnosti cementu. Zbylé receptury obsahovaly vždy rozdílné množství CNT. Použité množství CNT bylo 0,001, 0,005, 0,01 a 0,05 % z hmotnosti cementu.

Tabulka 4 – Receptura referenčních vzorků

Označení: REF	[g]
CEM I 42,5 R	450
písek CEN	1350
voda	200
super-plastifikační přísada COATEX ETHACRYL HF S.C. 40% – 0,2 % z m_c	0,9
CNT	-

Tabulka 5 – Receptura vzorků s CNT a amplitudou 72 %

Označení: AMP 72 0,001 %, AMP 72 0,005 %, AMP 72 0,01 % , AMP 72 0,05 %	[g]
CEM I 42,5 R	450
písek CEN	1350
voda	200
super-plastifikační přísada COATEX ETHACRYL HF S.C. 40% – 0,2 % z m_c	0,9
CNT – 0,001 % z m_c	0,0045
– 0,005 % z m_c	0,0225
– 0,01 % z m_c	0,045
– 0,05 % z m_c	0,225

Označení:

REF – záměs bez CNT s dávkou super-plastifikační přísady 0,2 % z hmotnosti cementu

AMP72 0,001 % – záměs s 0,001 % CNT z hmotnosti cementu, s dávkou super–plastifikační přísady 0,2 % z hmotnosti cementu, velikost amplitudy 72%

AMP72 0,005 % – záměs s 0,005 % CNT z hmotnosti cementu, s dávkou super–plastifikační přísady 0,2 % z hmotnosti cementu, velikost amplitudy 72%

AMP72 0,01 % – záměs s 0,01 % CNT z hmotnosti cementu, s dávkou super–plastifikační přísady 0,2 % z hmotnosti cementu, velikost amplitudy 72%

AMP72 0,05 % – záměs s 0,05 % CNT z hmotnosti cementu, s dávkou super–plastifikační přísady 0,2 % z hmotnosti cementu, velikost amplitudy 72%

8 Příprava vzorků

Nejdříve byla připravena záměs pro výrobu referenčních vzorků, tedy vzorků bez uhlíkových nanotrubiček. Na analytických vahách byla navážena super-plastifikační přísada COATEX ETHACRYL HF. Příklad byla přidána do 200 g vody, která byla navážena na laboratorních vahách. Voda spolu se super-plastifikační přísadou byla přelita do míchací nádoby. Následně bylo k vodě přidáno 450 g cementu, naváženého na laboratorních vahách. Po upevnění míchací nádoby do konstrukce laboratorní míchačky bylo míchání spuštěno. Míchací cyklus byl nastaven dle normy, kdy prvních 30 s byl cementový tmel míchán při nízkých otáčkách, poté byl během dalších 30 s přisypáván písek. Následovalo míchání za vysokých otáček po dobu 30 s, poté došlo k zastavení míchačky, kdy byla během prvních 15 s setřena pomocí stěrky malta do středu míchací nádoby. Míchání pokračovalo po dobu 60 s při vysokých otáčkách. Vzniklá malta byla plněna do normových, ocelových forem, které byly po dobu plnění umístěny na vibračním stole. Doba vibrace byla 2 minuty při amplitudě 0,75 mm, během té byly formy plněny ve třech vrstvách. Po skončení vibrace byl pomocí navlhčené špachtle zarovnan povrch vzorků. Jednotlivé vzorky byly označeny a překryty igelitem. Takto připravené vzorky byly uloženy ke zrání.

Následně byly vyrobeny vzorky s CNT. Jejich příprava byla složitější než příprava referenčních vzorků. Vzhledem k objemu rozetové nádoby pro ultrazvukový kavitátor, který je 100 ml, bylo nutné připravovat záměsovou vodu ve dvou dávkách. Ve 100 g vody bylo rozmícháno dané množství CNT a to buď 0,01125 g, 0,00225 g, 0,0225 g a 0,1125 g. Množství nanočástic bylo dáno přepočtem ze zadání, kdy bylo zadáno množství v procentech z hmotnosti cementu. Dále bylo v jedné dávce záměsové vody spolu s CNT rozmícháno i 0,45 g super-plastifikační přísady COATEX ETHACRYL HF. Přesné množství CNT a super-plastifikátoru bylo naváženo na analytických vahách. CNT a super–plastifikační přísada byly vsypány do kádinky s vodou a poté bylo vše pomocí magnetického míchadla rozmícháno. Míchání probíhalo po dobu 5 minut při 500 otáčkách za minutu. Takto připravená suspenze byla přelita do rozety, která byla umístěna v nádobě s ledem. Nádoba s rozetou byla umístěna pod držák sondy

ultrazvukového kavitátoru. Sonda ultrazvukového kavitátoru byla poté spuštěna do rozety tak, aby se sonda nedotýkala dna. Přístroj byl nastaven na požadovanou amplitudu a to 72 %. Poté byl přístroj zapnut. Po dobu míchání bylo nutné sledovat množství vzniklé energie, tato hodnota nesměla překročit 65 kJ. Po dosažení daného množství energie byl přístroj zastaven, sonda byla vysunuta ven z rozety. Obsah rozety byl přelit do kádinky a umístěn na magnetické míchadlo, kde byl při nízkých otáčkách míchán, dokud nebyla připravena druhá část záměsové suspenze.



Obrázek 14 – Dispergace CNT

Následně bylo přistoupeno k vlastnímu míchání cementové malty. Postup míchání byl stejný jako při přípravě referenčních vzorků. Vzniklou směsí byly opět plněny formy o rozměrech 40 × 40 × 160 mm uložené na vibračním stole. Plnění probíhalo ve třech vrstvách po dobu 2 minut při amplitudě 0,75 mm. Po ukončení vibrování byl povrch vzorků zarovnan a překryt igelitem. Takto připravené vzorky se uložily ke zrání.



Obrázek 15 – Vytvořené vzorky v ocelových formách

Vytvořené vzorky byly po dobu 24 hodin uloženy v laboratorních podmínkách. Po vyzrání byly vyjmuty z forem, označeny a uloženy ve vodním prostředí. Zde byly uloženy až do té doby, než byly zkoušeny na mechanické vlastnosti po 7 a 28 dnech. Na jednotlivých vzorcích byla po této době zkoušena pevnost v tahu za ohybu, na vzniklých půlkách poté pevnosti v tlaku.

9 Postupy zkoušek

9.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Číslo a název normy: ČSN EN 196 – 1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti [53]

Postup zkoušky

Stanovení pevnosti v tahu bylo prováděno na vytvořených vzorcích 40×40×160 mm, ve stáří 7 a 28 dnů od vytvoření. Vzorky byly před zkouškou vyjmuty z vodního prostředí, kde byly po celou dobu od odformování uloženy. Byly lehce osušeny vlhkým hadříkem. Následně byly změřeny jejich rozměry a stanovena jejich hmotnost.

Samotná zkouška pevnosti v tahu za ohybu se provádí pomocí zkušebního zařízení pro tříbodové zatěžování. Zkoušený trámeček se uloží na podpory zkušebního zařízení tak, aby zatěžovaná strana byla kolmá ke směru hutnění. Poté se vzorek zatěžuje rovnoměrně rostoucí silou 10–50 N·s⁻¹ až do doby, než dojde k porušení vzorku. Ze zkušebního zařízení se následně odečte velikost síly při porušení vzorku. Pevnost v tahu za ohybu se vypočítá ze vzorce:

$$R_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \text{ [MPa]}$$

kde

R_f ... pevnost v tahu za ohybu [MPa]

F ... síla při porušení [N]

l ... vzdálenost podpor, $l = 100 \text{ mm}$

b, h ... rozměry příčného průřezu vzorku [mm]

Výsledná pevnost v tahu za ohybu se stanoví jako aritmetický průměr ze třech hodnot pevností jednotlivých receptur s přesností na 0,1 MPa.

9.2 Stanovení pevnosti v tlaku

Číslo a název normy: ČSN EN 196 – 1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti [53]

Postup zkoušky

Zkouška pevnosti v tlaku se provádí na polovinách trámečků vzniklých po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Polovina trámečku se uloží na destičky zkušebního zařízení tak, aby zatěžovaná strana byla kolmá na směr hutnění. Zatěžování probíhá rovnoměrně rostoucí silou 50–500 N·s⁻¹ až do porušení vzorku. Pevnost v tlaku se následně vypočítá ze vztahu:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \text{ [MPa]}$$

kde

R_c ... *pevnost v tlaku [MPa]*

F_c ... *síla při porušení [N]*

1600 ... *plocha destiček (40 × 40 mm) [mm²]*

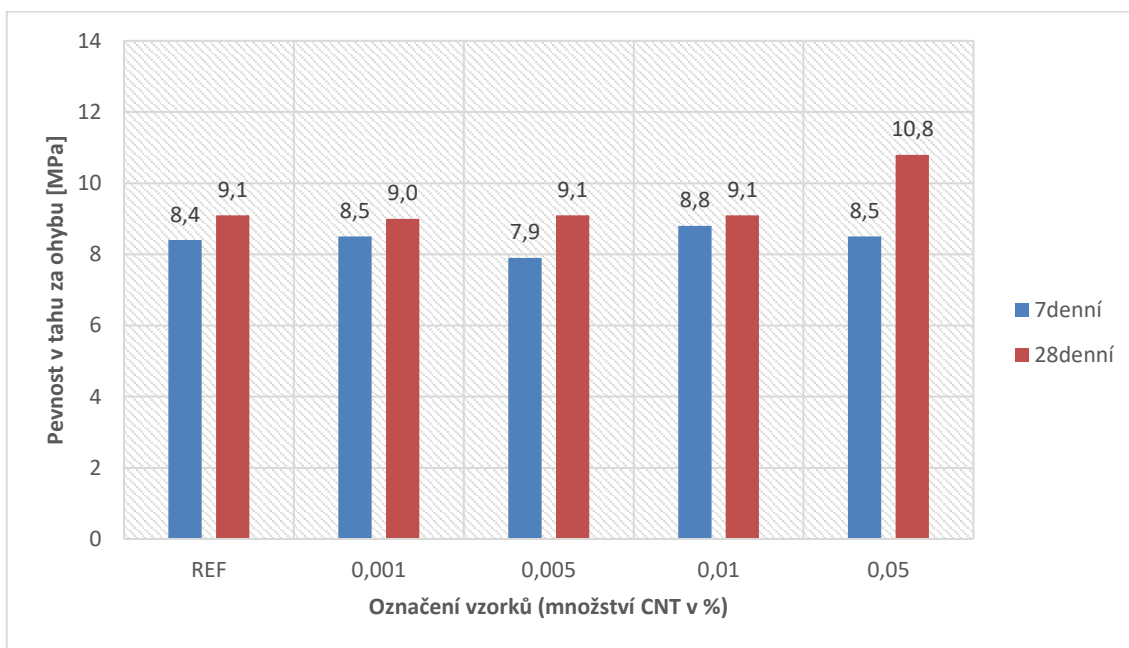
Výsledná pevnost v tlaku je stanovena aritmetickým průměrem ze 6 hodnot s přesností na 0,1 MPa.

10 Výsledky zkoušek

10.1 Pevnost v tahu za ohybu

Tabulka 6 – Pevnost v tahu za ohybu

Vzorek	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]		Nárůst/pokles pevnosti [%]	
	7denní	28denní	7denní	28denní
REF	8,4	9,1		
AMP72 0,001 %	8,5	9,0	1,2	-1,1
AMP72 0,005 %	7,9	9,1	-5,9	0
AMP72 0,01 %	8,8	9,1	4,8	0
AMP72 0,05 %	8,5	10,8	1,0	13,1

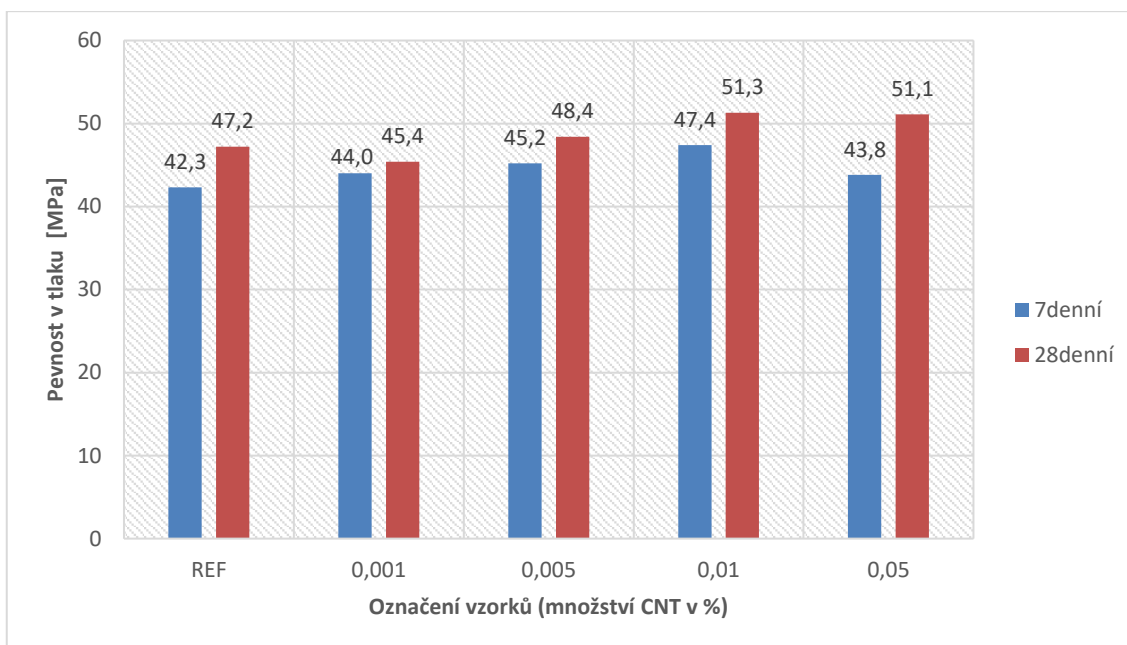


Graf 1 – Závislost pevnosti v tahu za ohybu, po 7 dnech a 28 dnech, na množství použitých CNT

10.2 Pevnost v tlaku

Tabulka 7 – Pevnost v tlaku

Vzorek	Pevnost v tlaku [MPa]		Nárůst/pokles pevnosti [%]	
	7denní	28denní	7denní	28denní
REF	42,3	47,2		
AMP72 0,001 %	44,0	45,4	3,9	-3,9
AMP72 0,005 %	45,2	48,4	6,9	2,6
AMP72 0,01 %	47,4	51,3	12,1	8,7
AMP72 0,05 %	43,8	51,1	3,6	1,5



Graf 2 – Závislost pevnosti v tlaku, po 7 dnech a 28 dnech, na množství použitých CNT

11 Diskuze výsledků

Cílem praktické části bakalářské práce bylo ověření možností zlepšení fyzikálně mechanických vlastností cementových kompozitů, vyztužených rozptýlenými uhlíkovými nanotrubičkami.

V experimentu byly použity uhlíkové nanotrubičky TNM7 od výrobce Yurui Chemical Co., LTD, Shanghai. Tyto trubičky byly dávkovány v množství 0,001, 0,005, 0,01 a 0,05 % z hmotnosti cementu. Jako povrchově aktivní látka pro účinnější dispergaci byla použita superplastifikační přísada COATEX ETHACRYL HF. Pro dispergaci CNT v záměsové vodě byla použita metoda ultrazvukové kavitace. Množství přivedené energie bylo pro všechny dávky stejné a to 65 kJ. Takto připravená suspenze pak byla použita k výrobě zkušebních vzorků cementové malty o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Na těchto vzorcích byla zkoušena pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku po 7 a 28 dnech. Získané výsledky stanovení pevnostních charakteristik byly následně porovnány s hodnotami pevností referenční cementové malty, bez CNT.

Důležitou zkouškou pro vyhodnocení účinku CNT v cementových kompozitech je stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Nejvyšších nárůstů pevností po 7 dnech dosahovaly vzorky s přídatkem 0,01 % CNT z hmotnosti cementu. Oproti referenčním vzorkům vykazovaly nárůst pevnosti o 4,8 %. Pevnost v tahu za ohybu u cementových malt s adicí CNT 0,01 % nevykazuje po 28 dnech ani nárůst pevností ani jejich pokles. To by mohlo potvrzovat tvrzení Agulla a jeho kolektivu, který zaznamenal po přidání CNT zvýšení počátečních pevností, ale při stanovení pevností po 28 dnech se pevnosti kompozitů s CNT nelišily od hodnot pevnosti vzorků referenčních. K tomuto jevu dochází zřejmě díky schopnosti uhlíkových nanotrubiček chovat se jako nukleační činidlo a urychlovat tak tvorbu C–S–H gelu. U vzorků s 0,005 % CNT došlo při zkoušení pevností v tahu po 7 dnech k poklesu pevnosti o 5,6 % a po 28 dnech vykazovaly pevnost stejnou jako vzorky referenční. Vzorek s 0,001 % CNT po 7 dnech vykazoval mírný nárůst pevnosti (1,2 %) a po 28 dnech došlo ke snížení pevnosti o 1,1 %. Vzorky s 0,05 % CNT nevykazovaly po 7 dnech zrání výrazné odchylky od pevnosti v tahu za ohybu od referenčních malt, avšak 28denní pevnosti v tahu za ohybu vykazovaly nárůst o 13,1 %. Podle literatury i dříve provedených experimentů měl být právě u vzorků s dávkou CNT 0,05 % dosažen nejvyšší nárůst pevností. Tento předpoklad se projevil pouze u 28denních pevností.

Změna pevnosti v tlaku v závislosti na přídatku CNT se projevila, až na vzorky s 0,001 % CNT z hmotnosti cementu, nárůstem pevností po 7 i 28 dnech, oproti vzorkům referenčním. Nejvýraznější nárůst pevností byl zaznamenán u vzorků s 0,01 % CNT. Po 7 dnech vykazovaly nárůst 12,1 % a 8,7 % po 28 dnech, oproti vzorkům referenčním. U vzorků s 0,001% obsahem CNT došlo nejprve k navýšení pevností o 3,9 % a následně po 28 dnech k poklesu o 3,9 %. Obecně lze tvrdit, že u všech sledovaných vzorků cementových malt s adicí CNT došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku. Zvýšení pevností bylo

výraznější po 7 dnech zrání. Po 28 dnech již nárůst pevnostních charakteristik nebyl oproti referenčním vzorkům tak výrazný.

12 Závěr

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá nejprve seznámením s termínem nanotechnologie a jejím využitím ve stavebnictví. Následně jsou v bakalářské práci popsány uhlíkové nanotrubičky, které se používají k vylepšení vlastností stavebních materiálů. V další části práce je uvedeno shrnutí historie objevení CNT, jejich možné struktury, vlastnosti a možné způsoby výroby. Dále jsou zde v tabulkách uvedeny některé komerčně vyráběné uhlíkové nanotrubičky a porovnány jejich vlastnosti. Závěr teoretické části je věnován právě využití uhlíkových nanotrubiček v cementových kompozitech. Tato část pojednává nejen o vlastnostech kompozitů vyztužených právě CNT, ale i zajímavých možnostech využití nanomateriálů. V neposlední řadě je v práci řešena dispergace CNT. Dispergace je klíčovým faktorem pro využití potenciálu nanomateriálu v cementových kompozitech. V této kapitole je popsána nejčastěji používaná dispergační metoda, ultrazvuková kavitace a zároveň i novinka v možnostech dispergace, a to rozptyl pomocí vysokotlakého pulsujícího vodního paprsku.

V praktické části bakalářské práce byl ověřován vliv uhlíkových nanotrubiček na fyzikálně–mechanické vlastnosti cementových kompozitů. Pro porovnání účinnosti CNT bylo vyrobeno 5 záměsů, z toho jedna sloužila jako referenční a zbylé obsahovaly uhlíkové nanotrubičky s odlišným dávkováním. Vliv uhlíkových nanotrubiček na cementové kompozity byl ověřen stanovením pevností v tahu za ohybu a tlaku. Nejlepších výsledků při stanovení pevnosti v tlaku bylo dosaženo s dávkou 0,01 % CNT z množství cementu, tedy 0,045 g. Při stanovení pevnosti v tahu za ohybu bylo nejlepších souhrnných výsledků dosaženo s dávkou 0,01 a 0,05 % CNT. Optimální dávkování vícevrstevných uhlíkových nanotrubiček TNM7 se na základě provedených stanovení pohybuje od 0,01 do 0,05 % z hmotnosti cementu, což je při dávce cementu 450 g na záměs 0,045–0,225 g.

Závěrem je nutno říci, že využití uhlíkových nanotrubiček a nanomateriálů vůbec, má velký potenciál ve stavebnictví. Jak již bylo v práci zmíněno, esenciálním faktorem pro práci s nanočásticemi je jejich bezchybná dispergace. Je proto důležité pokračovat ve výzkumech a zdokonalování zejména této části zkoumání nanomateriálů, aby mohly být běžně používány. Zdánlivě nevýhodným faktorem je pořizovací cena uhlíkových nanotrubiček. Ta je sice na první pohled vysoká, ale pro zlepšení vlastností stačí velice malé množství, tím pádem je jejich vliv na celkovou cenu zanedbatelný.

13 Seznam použité literatury

- [1] Definice nanotechnologie. In: *Nanocastice* [online]. b.r. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.nanocastice.cz/definice-nanotechnologie/>
- [2] Co je nano?. In: *Nanotrade* [online]. b.r. [cit. 2017-02-16]. Dostupné z: <http://www.nanotrade.cz/co-je-nano>
- [3] Nanotechnológie vo vývoji betónu. In: *Tzbportal* [online]. b.r. [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.tzbportal.sk/beton-betonarky/nanotechnologie-vo-vyvoji-betonu.html>
- [4] Nanotechnologie ve stavebnictví. In: *Stavba.tzb-info* [online]. b.r. [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/7101-nanotechnologie-ve-stavebnictvi>
- [5] Nanotechnology in construction. In: *Nanowerk* [online]. 2012 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=26700.php>
- [6] LABAJ, Martin, Rudolf HELA a Tomáš JAROLÍM. Nanočástice v materiálech na bázi cementu. *Beton* [online]. b.r., **2015**, 62-66 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2015-1-62_0.pdf
- [7] Nanotechnologie mění stavební průmysl. In: *Stavba.tzb-info* [online]. 2016 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/podlahy-pricky-povrchy/13966-nanotechnologie-meni-stavebni-prumysl>
- [8] Využití nanočástic. In: *Nanocastice* [online]. b.r. [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.nanocastice.cz/vyuziti-nanocastic/>
- [9] DULEBA, Branislav, František GREŠKOVIČ a Volodymyr KRASINSKIY. UHLÍKOVÉ NANOTRUBICE- MATERIÁL PRE BUDÚCNOSŤ. *Transfer inovácií* [online]. 2011, **2011**(21), 192-197 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/21-2011/pdf/192-197.pdf>
- [10] Uhlík. In: *Prvky* [online]. b.r. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/6.html>
- [11] Uhlík. In: *Zschemie* [online]. b.r. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.zschemie.euweb.cz/uhlik/uhlik2.html>

- [12] STEHLÍK, M. Anorganická chemie I: Uhlík a křemín. In: *Is.muni* [online]. 2005 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/C2442/skripta/kapitola0602.html>
- [13] Modifikace uhlíku. In: *Icoachmath* [online]. b.r. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <httpwww.icoachmath.comchemistrydefinition-of-allotropy-of-carbon.html>
- [14] AQELA, A., K. M. M. ABOU EL-NOURB, Reda A. A. AMMAR a A. AL-WARTHANC. Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation. *Arabian Journal of Chemistry*. 2012, **2012**(1), 1-23.
- [15] PRÁŠEK, Jan. *Uhlíkové nanočástice: grafen, nanotrubičky, fullereny: Uhlíkové nanotrubičky*. 2011. Brno, 2011.
- [16] CHOUDHARY, Veena a Anju GUPT. Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposites. *Carbon Nanotubes - Polymer Nanocomposites* [online]. 2011. InTech, 2011, s. 66-69 [cit. 2017-03-18]. DOI: 10.5772/18423. ISBN 9789533074986. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-polymer-nanocomposites/polymer-carbon-nanotube-nanocomposites>
- [17] Scientists delve deeper into carbon nanotubes. In: *Physicsworld* [online]. b.r. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://physicsworld.com/cws/article/news/2013/feb/19/scientists-delve-deeper-into-carbon-nanotubes>
- [18] *Carbon Nanotube Science Synthesis, Properties and Applications*. Leiden: Cambridge University Press, 2009. ISBN 9780511516917.
- [19] SALVETAT, J.-P., J.-M. BONARD, N.H. THOMSON, A.J. KULIK, L. FORRÓ, W. BENOIT a L. ZUPPIROLI. Mechanical properties of carbon nanotubes. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* [online]. 1999, **69**(3), 255-260 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1007/s003390050999. ISSN 09478396. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s003390050999>
- [20] Mechanical properties of carbon nanotubes. In: *Wikipedia* [online]. b.r. [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_properties_of_carbon_nanotubes
- [21] KAUSHIK, Brajesh Kumar a Manoj Kumar MAJUMDER. Carbon Nanotube: Properties and Applications. *Carbon Nanotube: Properties and Applications* [online]. 2015, s. 17 - 37 [cit. 2017-03-22]. DOI: 10.1007/978-81-322-2047-3_2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-81-322-2047-3_2
- [22] CHOUDHARY, Veena, B.P. SINGH a R.B. MATHUR. Carbon Nanotubes and Their Composites. *Syntheses and Applications of Carbon Nanotubes and Their*

- Composites: Properties* [online]. InTech, 2013, s. 194 - 222 [cit. 2017-03-22]. DOI: 10.5772/52897. ISBN 9789535111252. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/syntheses-and-applications-of-carbon-nanotubes-and-their-composites/carbon-nanotubes-and-their-composites>
- [23] LIU, Ying, Yuliang ZHAO, Baoyun SUN a Chunying CHEN. Understanding the Toxicity of Carbon Nanotubes. *Accounts of Chemical Research* [online]. 2013, **46**(3), 702-713 [cit. 2017-05-22]. DOI: 10.1021/ar300028m. ISSN 00014842. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ar300028m>
- [24] BELLUCCI, S. *Nanoparticles and nanodevices in biological applications: Carbon Nanotubes Toxicity*. Berlin: Springer, 2009. INFN lectures, v. 1. ISBN 9783540709466.
- [25] RŮŽIČKA, Vlastimil. Nanotechnologie ve stavebnictví. *TZB - info* [online]. b.r., **2011** [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/7101-nanotechnologie-ve-stavebnictvi>
- [26] Oxidační stres. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. b.r. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxida%C4%8Dn%C3%AD_stres
- [27] JOURNET, C. a P. BERNIER. Production of carbon nanotubes. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* [online]. 1998, **67**(1), 1-9 [cit. 2017-03-22]. DOI: 10.1007/s003390050731. ISSN 09478396. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s003390050731>
- [28] DAI, Hongjie. Carbon nanotubes: opportunities and challenges. *Surface Science*. 2002, **500**(1-3), 218-241. DOI: 10.1016/S0039-6028(01)01558-8. ISSN 00396028. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0039602801015588>
- [29] RAFIQUE, Muhammad Musaddique Ali a Javed IQBAL. Production of Carbon Nanotubes by Different Routes-A Review. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences* [online]. 2011, **01**(02), 29-34 [cit. 2017-04-30]. DOI: 10.4236/jeas.2011.12004. ISSN 21614865. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/jeas.2011.12004>
- [30] SZABÓ, Andrea, Caterina PERRI, Anita CSATÓ, Girolamo GIORDANO, Danilo VUONO a János B. NAGY. Synthesis Methods of Carbon Nanotubes and Related Materials. *Materials* [online]. 2010, **3**(5), 3092-3140 [cit. 2017-04-30]. DOI: 10.3390/ma3053092. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/3/5/3092/>
- [31] BRONIKOWSKI, Michael J., Peter A. WILLIS, Daniel T. COLBERT, K. A. SMITH a Richard E. SMALLEY. Gas-phase production of carbon single-walled nanotubes

- from carbon monoxide via the HiPco process: A parametric study. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* [online]. 2001, 19(4), 1800-1805 [cit. 2017-05-06]. DOI: 10.1116/1.1380721. ISSN 07342101. Dostupné z: <http://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.1380721>
- [32] Yurui(Shanghai)Chemical Co.,Ltd [online]. b.r. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://riyngroup.lookchem.com/>
- [33] Nanocyl [online]. b.r. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.nanocyl.com/>
- [34] Shenzhen Nanotech Port Co. Ltd(NTP) [online]. b.r. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.nanotubes.com.cn/>
- [35] Chasm Advanced Materials, Inc. [online]. b.r. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.chasmttek.com/>
- [36] NanoIntegris [online]. b.r. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.nanointegris.com/>
- [37] NC7000™. In: *Nanocyl* [online]. b.r. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.nanocyl.com/product/nc7000/>
- [38] S-MWNT-1020. In: *Nanotubes* [online]. b.r. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.nanotubes.com.cn/products.aspx>
- [39] TNM7. In: *Nano Material* [online]. b.r. [cit. 2017-05-17].
- [40] HiPCO® purified. In: *Nanointegris* [online]. www.nanointegris.com [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.nanointegris.com/en/hipco>
- [41] SG76. In: *Chasmttek* [online]. b.r. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: https://media.wix.com/ugd/1cb1e5_81e8bb96aff64117a5961201c18e50f9.pdf
- [42] SWNT-1. In: *Nanotubes* [online]. b.r. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.nanotubes.com.cn/products.aspx>
- [43] Carbon nanotube cement composites. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* [online]. 2016, **2016**, 420-427 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=7&IType=5>
- [44] KONSTA-GDOUTOS, Maria S., Zoi S. METAXA a Surendra P. SHAH. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. *Cement and Concrete Research* [online]. 2010, **40**(7), 1052-1059 [cit. 2017-05-08]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.015. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884610000542>

- [45] MANZUR, Tanvir, Nur YAZDANI a Md. Abul Bashar EMON. Potential of Carbon Nanotube Reinforced Cement Composites as Concrete Repair Material: Tanvir Manzur,¹ Nur Yazdani,² and Md. Abul Bashar Emon¹. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2016, **2016**, 1-10 [cit. 2017-05-11]. DOI: 10.1155/2016/1421959. ISSN 1687-4110. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2016/1421959/>
- [46] MANZUR, Tanvir a Nur YAZDANI. Optimum mix ratio for carbon nanotubes in cement mortar. *KSCE Journal of Civil Engineering* [online]. 2015, **19**(5), 1405-1412 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1007/s12205-014-0721-x. ISSN 12267988. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12205-014-0721-x>
- [47] FERRO, Giuseppe, Jean-Marc TULLIANI a Simone MUSSO. *Carbon nanotubes cement composites* [online]. Italia, 2011, , 49-59 [cit. 2017-05-08].
- [48] GKIKAS, G., N.-M. BARKOULA a A.S. PAIPETIS. Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2012, **43**(6), 2697-2705 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.070. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812001199>
- [49] FOLDYNA, Josef, Vladimír FOLDYNA a Michal ZELENÁK. Dispersion of Carbon Nanotubes for Application in Cement Composites. *Procedia Engineering* [online]. 2016, , 94–99 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.643. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816311511>
- [50] JANG, Sung-Hwan, Shiho KAWASHIMA a Huiming YIN. Influence of Carbon Nanotube Clustering on Mechanical and Electrical Properties of Cement Pastes. *Materials* [online]. 2016 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.3390/ma9040220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/4/220>
- [51] Kavítace. In: *Wikipedie* [online]. Wikipedie, Otevřená encyklopedie, 2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavítace>
- [52] SONOPULS Ultrasonic homogenizers. In: *Bandelin.com* [online]. b.r. [cit. 2017-05-17].
- [53] ČSN EN 196 – 1 *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. b.r.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Jubilee Church v Římě [5]	13
Obrázek 2 – Krystalické mřížky modifikací uhlíku [13]	14
Obrázek 3 – Typy konstrukcí SWCNT [16]	15
Obrázek 4 – DWCNT a MWCNT [17]	15
Obrázek 5 – Schéma přístroje pro výrobu CNT obloukovým výbojem [27]	20
Obrázek 6 – Schéma přístroje pro výrobu CNT pomocí laserové ablace [22]	21
Obrázek 7 – Schéma přístroje pro výrobu CNT pomocí CVD	22
Obrázek 8 - Schéma přístroje pro výrobu CNT pomocí HiP CO [31]	22
Obrázek 9 – Přemostění trhliny uhlíkovými nanotrubičkami [43]	26
Obrázek 10 – Rozptýlení CNT v cementovém kompozitu [9]	27
Obrázek 11 – Optimální množství MWCNT a superplastifikačních přísad podle poměru stran CNT pro vyztužení v materiálech na bázi cementu [44]	29
Obrázek 12 – Ultrazvuková sonda BANDELI SONOPULS [52]	31
Obrázek 13 – Schéma akustického generátoru pulzujícího paprsku [49]	32
Obrázek 14 – Dispergace CNT	36
Obrázek 15 – Vytvořené vzorky v ocelových formách	36

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Porovnání mechanických vlastností vybraných materiálů [20]	16
Tabulka 2 – Vlastnosti komerčně vyráběných MWCNT [37] [38] [39]	24
Tabulka 3 – Vlastnosti komerčně vyráběných SWCNT [40] [41] [42]	25
Tabulka 4 – Receptura referenčních vzorků	34
Tabulka 5 – Receptura vzorků s CNT a amplitudou 72 %	34
Tabulka 6 – Pevnost v tahu za ohybu	39
Tabulka 7 – Pevnost v tlaku	40

Seznam grafů

Graf 1 – Závislost pevnosti v tahu za ohybu, po 7 dnech a 28 dnech, na množství použitých CNT	39
Graf 2 – Závislost pevnosti v tlaku, po 7 dnech a 28 dnech, na množství použitých CNT	40

Přílohy

CEM I 42,5 R Portlandský cement EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list

červen 2016

Fyzikální a mechanické vlastnosti				Chemické vlastnosti		
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrná hodnota	Metoda / poznámka
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	14	EN 196-1	Obsah [%]	CaO	64,2
	2 dny	29	EN 196-1		SiO ₂	19,5
	7 dní	51	EN 196-1		Al ₂ O ₃	4,7
	28 dní	61	EN 196-1		Fe ₂ O ₃	3,2
	56 dní	66	EN 196-1		MgO	1,3
	90 dní	67	EN 196-1		SO ₃	3,2
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4	EN 196-1		Cl ⁻	0,047
	2 dny	6	EN 196-1		K ₂ O	0,78
	7 dní	8	EN 196-1		Na ₂ O	0,09
	28 dní	9	EN 196-1	Na ₂ O ekvivalent [%]		0,6
	56 dní	9	EN 196-1	Nerozpustný zbytek [%]		0,7
	90 dní	9	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]		3,3
Normální konzistence [%]		27,7	EN 196-3			
Počátek tuhnutí [min]		201	EN 196-3			
Konec tuhnutí [min]		264	EN 196-3			
Objemová stálost [mm]		0,8	EN 196-3, Le Chatelier			
Měrný povrch [m ² .kg ⁻¹]		381	EN 196-6, Blaine			
Hydratační teplo [J.g ⁻¹]		7 dní	310			

Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	95-100 %
Doplňující složka		0-5 %

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří síran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404																	
Bez rizika	Koroze způsobená karbonátací				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ^{a)}	✓ ^{a)}	✓	✓	✓

a) Při chemické síranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 - koncentrace síranových iontů SO₄²⁻ vyšší než 600 mg/litr v podzemní vodě nebo 3000 mg/kg (v případě kapilárního sání 2000 mg/kg) v rostlé zemině - se musí použít síranovzdorný cement SR. Při obsahu SO₄²⁻ - do 1500 mg/litr je možné použít CEM I s dostatečnou dávkou pucolánové příměsí (například alespoň 20 % popílku).

V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr⁶⁺ v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).

Hodnoty uvedené v technickém listu mají čistě informativní charakter a mohou se lišit od hodnot konkrétních vzorků. Před jejich porovnáním s vlastnostmi jiných výrobků se prosím ujistěte, že všechna porovnávaná data byla získána pomocí totožných zkušebních postupů. V případě pochybností nás neváhejte kontaktovat.

Českomoravský cement, a.s.
Technická podpora prodeje
technicka.podpora@cmcem.cz
+420 544 122 544

www.cmcem.cz

**ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT**
HEIDELBERGCEMENT Group

CONSTRUCTION



ETHACRYL™ HF

Polycarboxylate Ether for Concrete Admixtures

Ethacryl™ HF is a high-performance aqueous dispersant designed for use in concrete applications.

Ethacryl™ HF is a key component for formulating concrete admixtures.

It provides fluidity to concrete formulations at substantially reduced water content. Benefits include increased productivity, lower costs and improved concrete properties. It has been specifically designed for **Self Compacting Concrete** and for **High Performance Concrete**.

• TYPICAL ANALYSIS

Nature: Aqueous solution of Polycarboxylate Ether

Appearance (20°C): Yellow to brownish liquid

Solids content (%): 40

pH (20°C): 4

Specific gravity (20°C): 1.07

Viscosity (mPa.s): 350

Chloride content (%): < 0.01

Alkali content (Na₂O_{eq}): < 1.5

• ADVANTAGES

Ethacryl™ HF features:

- New generation of polycarboxylate ether
- High water reduction ability
- Effectiveness at low dosage
- Easy to formulate

Ethacryl™ HF benefits:

- Increases productivity
- Reduces costs
- Confers good pumpability to concrete

Ethacryl™ HF is a key component for designing concrete admixtures. As a new generation of polycarboxylate ether, **Ethacryl™ HF** enables the formulator to achieve high performance superplasticizing admixtures.

Ethacryl™ HF is fully compatible with the major chemicals and additives used in concrete admixtures.

• APPLICATIONS

Ethacryl™ HF due to its exceptional capacity to control flow of cement is used as a high **water reducing agent**. In standard conditions, in combination with a defoamer, water reduction of 30% is achieved.

Ethacryl™ HF has been specifically designed for **Self Compacting Concrete (SCC)** and for **High Performance Concrete (HPC)**.

Remark:

When incorporating **Ethacryl™ HF** into your concrete formulation, it is noteworthy that the dispersing power of **Ethacryl™ HF** is not immediate. During the first minutes of mixing a dough is obtained. Then, **Ethacryl™ HF** turns the blend into a very fluid media.

Recommendations:

Ethacryl™ HF does not contain defoamers. When a specific level of air entrapment is targeted, formulating **Ethacryl™ HF** together with **Rhealis™ Dfoam** is recommended.

Anti-synergistic effects have been reported when mixing polycarboxylate ethers and polynaphthalene sulfonates.

• STORAGE

Ethacryl™ HF can present colour variations from light yellow to slightly brown. These variations can occur in normal storage conditions. They have no influence on the product performances.

Ethacryl™ HF should be protected from the effects of weathering and stored between 5 and 40°C.

In these conditions, products should be used within 12 months after delivery.

• STANDARD PACKAGING

- Bulk deliveries
- 1 000 l containers

• HEALTH & ENVIRONMENTAL DATA

Please refer to the Material Safety Data Sheet.

Website: www.coatex.com

The information contained in this technical documentation relates only to the specific material designated herein and does not relate to use in combination with any other material or in any process. The information provided herein is based on technical data that Coatex believes to be reliable, provided that Coatex makes no representation or warranty as to the completeness or accuracy thereof and Coatex assumes no liability resulting from its use for any claims, losses, or damages of any third party. Recipients receiving this information must exercise their own judgment as to the appropriateness of its use and it is the user's responsibility to assess the material's suitability (including safety) for a particular purpose prior to such use. Reference to trade names used by other companies is neither a recommendation, nor does it imply that similar products could not be used (2015/11/19)