NANOČÁSTICE V MATERIÁLECH NA BÁZI CEMENTU ▮ NANOPARTICLES IN CEMENT BASED MATERIALS

Martin Labaj, Rudolf Hela, Tomáš Jarolím

První část příspěvku je věnována historii nanotechnologie a současnému stavu na poli nanotechnologie betonu. V druhé části příspěvku je popsán experiment, jehož cílem bylo zjistit možnosti užití uhlíkových nanotrubiček pro zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností cementových kompozitů a současně možnosti jejich rozmíchání a zabránění reaglomerace v roztoku. ▮ The first part of the article is dedicated to the history of nanotechnology and to the current situation in the field of nanotechnology in concrete. The second part describes the experiment aiming at finding possibilities of using carbon nano-tubes to improve physical and mechanical features of concrete composite and at the same time improve their distribution and preventing their segregation in the solution.

Ačkoli my, lidé, se takzvanými nanotechnologiemi, tedy zkoumáním a zasahováním do látek na nejelementárnější úrovni, zabýváme teprve posledních několik desítek let, přírodní nanotechnologie existují podstatně déle. Díky sestavování atom po atomu a molekula po molekule vznikly materiály jako pavučina nebo schránky měkkýšů – materiály s extrémně výhodnými vlastnostmi, které zatím lidstvo nedokáže synteticky napodobit.

NANOTECHNOLOGIE A NANOMATERIÁLY

Slovo „nanotechnologie“ se samozřejmě pro přírodní materiály nepoužívá – to bychom mohli jako nanomateriál označit naprosto cokoli. Definici nanotechnologie lze shrnout do stručné věty „*Výzkum a umělá modifikace materiálů na atomární a molekulární úrovni.*“ s důrazem na „umělá“. [1]

Myšlenka, že je něco takového vůbec možné, poprvé zazněla roku 1959 na vizionářské přednášce Richarda Feynmana s názvem „There's Plenty of Room at the Bottom“, jejíž pointou byla Feynmanova teorie, že neexistují fyzikální zákony, které by vylučovaly cílenou manipulaci s atomy. Jakkoli odvážná se tehdy tato myšlenka mohla zdát, dnes již víme, že měl před 55 lety pravdu. [1][2]

Jako nanomateriály lze označit všechny materiály vytvořené pomocí nanotechnologií, tedy cíleným zásahem člověka do nanostruktury. Ty poté mohou oproti svým obyčejným protějškům jak vykazovat lepší primární vlastnosti, pevnost a trvanlivost, tak nabývat vlastnosti zcela nové. Pravděpodobně v souvislosti s trendem posledních let jsou tyto vlastnosti označovány jako „chytré“. Jde např. o schopnost samočištění, samomonitorování průběhu napětí, či dokonce samoopravování.

Obory jako kosmonautika nebo farmacie již první nanomateriály využívají, stavebnictví si bohužel musí na své nano-průkopníky počkat. Potenciál je přitom obrovský. Literatura uvádí možnosti jako např.:

- Zlepšení vlastností cementových kompozitů, což by zároveň vedlo ke snížení uhlíkové stopy portlandského slinku.
- Výroba levné nekorodující oceli.
- Nová generace tepelně izolačních materiálů.
- Nátěry se schopností samočištění nebo změny barvy.
- Výroba nanosenzorů a materiálů schopných samodiagnózy a samoopravy. [3]

NANOTECHNOLOGIE BETONU

Jedním z následků rostoucí městské výstavby je zvyšující se množství spotřebovaného betonu a s tím související nárůst objemu výroby cementů. Současným trendem je využívání směsných cementů, které méně zatěžují životní prostředí jednak snížením produkce CO_2 a také omezením těžby přírodních surovin.

Alternativním a modernějším řešením je zvyšování kvalitativních parametrů betonu. Lepší mechanické vlastnosti umožní snížení dimenzí konstrukčních prvků. Vyšší trvanlivost odloží potřebu sanací o desetiletí. Autoři jako např. E. Mora uvádí, že návrhem konstrukce na desetinásobnou životnost desetinásobně klesne zátěž životního prostředí [4]. Využití nanotechnologií a nanočástic pro výrobu vysokohodnotného betonu se jeví jako velmi perspektivní možnost.

VHODNÉ NANOČÁSTICE

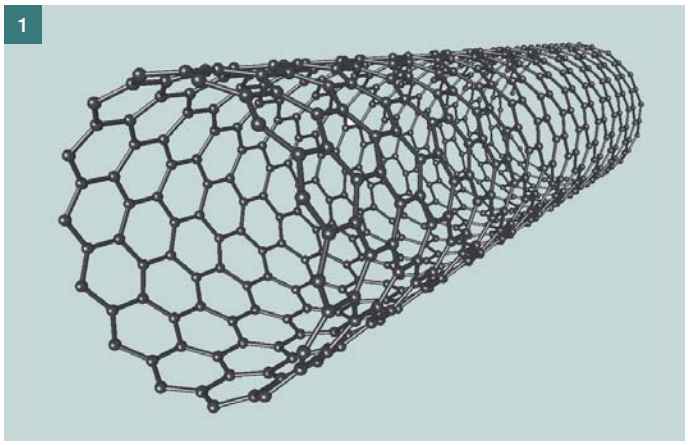
Z nepřeberného množství existujících nanočástic vykazují jen některé kompatibilitu s cementovou matricí. Těmi nejperspektivnějšími jsou nanosilika, uhlíkové nanotrubičky, nanojíly, nano-oxid titaničitý, nano-oxid železitý a nanocement. Na následujících řádcích budou stručně probrány.

Nanosilika

Nanosilka je menší sourozenec mikrosiliky, chemicky naprosto totožný, tedy téměř 100% amorfní SiO_2. Velikost jeho částic se pohybuje v rozmezí 1 až 100 nm v závislosti na technologii výroby, což je až o tři řády menší, než v případě už tak velice jemné mikrosiliky. Obrovský měrný povrch má zásadní vliv na reaktivitu – pucolanitu nanosiliky. Pucolanita je schopnost reagovat s krystaly portlanditu za vývoje sekundárních gelových C-S-H fází, což přispívá k lepším mechanickým a trvanlivostním vlastnostem cementového kamene. Nezreagovaná nanosilika se poté může chovat jako nanofiller. Optimální dávka nanosiliky se pohybuje v rozmezí 1 až 10 % hmotnosti cementu a je vhodné ji stanovit experimentálně (stejně jako dávkování všech nanočástic). Výzkumy ukazují, že přídavek nanosiliky vede zejména ke zvýšení tlakové pevnosti a snížení permeability. Dále byl prokázán pozitivní vliv na rychlost pucolánové reakce elektrárenského popílku, kdy po 24 h bylo dosaženo stejné úrovně reakce, jako u samotného popílku po 6 měsících. [5]

Uhlíkové nanotrubičky

Obrovská pozornost je v posledních letech věnována uhlíkovým nanotrubičkám (CNT). Jejich přednostmi jsou extrémně dobré mechanické vlastnosti – pevnost v tahu až 200 GPa a Youngův modul pružnosti až 5 TPa – a nízká objemová hmotnost 1 330 $kg \cdot m^{-3}$, čímž se přímo nabízí k využití jako rozptýlené nanovýztuže. Pokud bychom se na nanotrubičku podívali (velmi) z blízka, vypadala by jako extrémně dlouhý a úzký válec ze „slepičího pletiva“. Tato hexagonální mřížka je tvořena silně vázanými atomy uhlíku a nazývá se grafen. Podle počtu stěn uhlíkové nanotrubičky dělíme na jedno- a vícestěnné, přičemž druhé zmíněné jsou zejména z důvodů nižší ceny používány častěji. Typické rozměry vícestěnné nanotrubičky jsou 10 až 50 nm v průměru a 0,1 až 10 μm na délku, jednostěnné mívají oba rozměry zpravidla menší. Vlivem velmi malých rozměrů a extrémního štíhlostního poměru se CNT relativně obtížně zapojují do struktury



Obr. 1 Struktura jednostěnné uhlíkové nanotrubičky ▮ Fig. 1 Structure of a single-walled carbon nanotube

cementových hydrátů. Jednak inklinují k aglomeraci a „zamotávají" se, a jednak se těžko „kotví". Nejlepší soudržnosti s cementovou matricí dosahují trubičky zcela obalené jemně krystalickými C-S-H fázemi. Naopak obklopeny většími krystaly či póry ztrácí na efektivitě. Použití výkonných surfaktantů (*povrchově aktivní látky snižující povrchové napětí, pozn. red.*) a dispergačních metod je nezbytné. Při vhodné dávce, pohybující se dle různých zdrojů od 0,025 do 0,1 % hmotnosti cementu a odpovídající úrovni dispergace lze dosáhnout navýšení ohybové pevnosti cementové malty až o 25 % a Youngova modulu pružnosti o 45 %. [1][5][6]

Nanojíly

Nanojíly, na rozdíl od nanosiliky, obsahují kromě křemičité i hlinitou složku, která se při hydrataci podílí na vzniku kalcium-alumosikilátových fází. Nezreagované částice nanojílu do svých mezimřížkových prostor velmi dobře absorbují vodu a kromě nanofilleru tak plní i funkci jakéhosi „rezervoáru", který vodu postupně uvolňuje, čímž jednak klesá obsah volné vody a tedy pórovitost a jednak stoupá stupeň hydratace cementu – tzv. efekt samoošetřování. Konkrétní vliv na mechanické vlastnosti cementových kompozitů se liší v závislosti na typu nanojílu, jeho chemickém složení, morfologii apod. Lze ale konstatovat, že v některých případech bylo dosaženo až 50% nárůstu tlakové pevnosti a rovněž výrazného snížení propustnosti. Velmi dobrých výsledků je dosahováno zejména při použití nanočástic metakaolínu. [7][8]

Nano-oxid titaničitý

Fotokatalytický efekt oxidu titaničitého je známý již několik let (*viz BTKS 6/2011, str. 28, A. Folli, pozn. red.*). Jednoduše řečeno je TiO_2 fotokatalyzátor, který je za přítomnosti UV záření schopen zprostředkovat oxidační reakci, při které dochází k rozkladu molekul organických nečistot na neškodné látky. Zároveň na sebe ochotně navazuje hydroxylové skupiny, díky kterým získává povrch vysoký stupeň hydrofility. Tenký vodní film poté vytvoří kluzký povrch, na kterém se nečistoty prakticky neudrží a lze je jednoduše smýt. Při integraci TiO_2 do cementového kompozitu tento v důsledku obou popsaných dějů získává schopnost samočištění. Nano-forma oxidu titaničitého je efekt ještě zesiluje. Kromě toho se nehydraulický nano-TiO_2 může podílet na mírném zlepšení mechanických vlastností, protože nanočástice mají pozitivní vliv na růst cementové matrice s jemnější a dokonalejší strukturou, v které zároveň vyplňují gelové a kapilární póry. Optimální dávka je do 10 % hmotnosti cementu, při větším množství již nelze docílit efektivního rozptýlení nanočástic a dochází k reaglomeraci, vzniku slabých míst v matrici a zhoršení mechanických vlastností kompozitu. [9]

Nano-oxid železitý

Další z nanočástic, umožňujících výrobu betonu s „chytrými" vlastnostmi, je oxid železitý – Fe_2O_3. Na běžné vlastnosti cementových kompozitů má podobný vliv jako nano-TiO_2. To znamená, že při dávce do 10% hmotnosti cementu dochází k mírnému zlepšení vlastností, při jejím překročení je tomu pak přesně opačně. Bylo ovšem zjištěno, že přítomnost nano-Fe_2O_3 v matrici způsobuje změnu elektrického odporu kompozitu v přímé závislosti na velikosti aplikovaného napětí. Při zatěžování do porušení elektrický odpor lineárně klesá až o 45 % při dávce 5 % hmotnosti cementu. Důvodem je přibližování rovnoměrně rozptýlených nanočástic při deformaci, čímž se usnadní přestup elektronů, a tím se zvýší elektrická vodivost. Taková vlastnost betonu by byla neocenitelným nástrojem pro kontinuální monitorování průběhu napětí a deformací v konstrukcích. [10]

Nanocement

K nanopucolánu a rozptýlené nanovýztuži může být doplňkem nanopojivo – nanocement. Ten lze připravit buď vysoce intenzivním suchým či mokrým (aktivačním) mletím nebo chemickou syntézou, kdy jsou nanocementová zrna cíleně sestavena z molekul jednotlivých hydraulických oxidů. Přídavek mletého nanocementu měl v provedených experimentech vliv na rychlost hydratace a konečné tlakové pevnosti, kdy bylo po 28 dnech dosaženo až 36% navýšení. Malta ze syntetického nanocementu, který připravil Jo a kol., sice nevykazovala lepší mechanické vlastnosti ve srovnání s běžným portlandským cementem, nicméně její objemová hmotnost byla o třetinu nižší a rovněž eliminace energeticky náročné výroby portlandského slínku může být zajímavým faktorem. [11] [12]

PROBLEMATIKA TOXICITY

Pokud mají být nanotechnologie kladně přijaty veřejností, je nutné přesně definovat jejich zdravotní a ekologickou (ne)závadnost. Tyto otázky jsou předmětem výzkumu již několik desetiletí a v současné době je již popsáno několik způsobů toxicity nanočástic, avšak žádný nich není tzv. nano-specifický, tedy nový a typický pouze pro nanočástice. Řada vědců nicméně nano-specifickou toxicitu předpokládá a dále intenzivně zkoumá.

Mezi známé druhy toxicity nanočástic patří:

- Toxicita způsobená velikostí částic, usnadňující vdechnutí a způsobující řadu plicních problémů.
- Toxicita způsobená povrchovým napětím, ovlivňujícím a poškozujícím živé buňky.
- Toxicita způsobená chemickým složením, zejména přítomností biologicky aktivních látek – např. redoxně aktivních přechodných kovů. Ty v plicích reagují za vzniku volných radikálů, které způsobují mutace nebo smrt živých buněk.
- Toxicita způsobená tvarem částic, „proslavená" zejména vláknitým azbestem.
- Toxicita způsobená dávkou částic – u nanočástic je škodlivá dávka několikanásobně nižší.

PROBLEMATIKA DOSTUPNOSTI

Na rozdíl od součástí raketoplánů nebo mikročipů je beton velmi obyčejný materiál, který si musí zachovat určitou úroveň objemu výroby a výrobních nákladů. Ačkoli se ceny nanočástic s vývojem nových a efektivnějších technologií produkce neustále snižují, stále se ještě nedostaly na úroveň, která by umožňovala jejich průmyslové nasazení. Výjimkou mohou být uhlíkové nanotrubičky, jejichž nízké dávkování (do 0,05 % hmotnosti cementu) cenu na 1 m^3 betonu výrazně redukuje. Nelze ale předpokládat, že se beton vyztužený uhlíkovými nanotrubičkami v dohledné budoucnosti stane běžným konstrukčním materiálem, mnohem spíše si tyto vysokohodnotné betony najdou místo ve vybraných náročnějších stavbách.

PROBLEMATIKA DISPERGACE

Jak již bylo řečeno, nanočástice jsou velice drobné částice, velikostí se blížící rozměrům molekul. Velikosti částic je nepřímo úměrný měrný povrch, a s ním související povrchové napětí, síla snažící se tvorbou aglomerátů minimalizovat měrný povrch, a tím dosáhnout stavu rovnováhy. Shluky často dosahují až mikrometrových rozměrů a tato „prázdná“ hnízda mohou v kompozitu působit i negativně. Správně provedenou dispergací a následnou stabilizací lze tomuto úspěšně předejít.

Jednou z nejefektivnějších metod dispergace je takzvaná kavitace (z latinského *cavitas* – dutina). Při tomto fyzikálním ději dochází vlivem lokálního poklesu tlaku v kapalině ke vzniku velmi malých „prázdných“ bublinek, které okamžitě implodují (*imploze – destrukce způsobená podtlakem, opak exploze, pozn. red.*) za uvolnění značného množství energie. Energie v kapalině vyvolává smyková napětí, která efektivně překonávají povrchové síly nanočástic a oddělují je od sebe. Použití kompatibilní povrchově aktivní látky je vhodné jednak kvůli usnadnění dispergace – snížení potřebného množství dodané energie a jednak pro stabilizaci suspenze po ukončení jejího dodávání. Volbu povrchově aktivní látky i jejího dávkování je vhodné ověřit experimentálně.

Efekt přídavku nanočástic do cementového kompozitu se nejlépe projeví při srovnání vylepšované vlastnosti – např. pevnosti – s referenčním vzorkem. Pro určení kvality dispergace a stability suspenze je však takové stanovení nepraktické. Zde lze s výhodou použít některých méně či více komplikovaných laboratorních metod. Tou úplně nejjednodušší a nejrychlejší je optické pozorování. Samotné nanočástice sice holým okem viditelné nejsou, jejich shluky ovšem často dosahují až mikrometrových rozměrů. Ty jsou poté na laboratorním sklíčku patrné jako drobné tečky, jejichž výskyt značí nízkou kvalitu dispergace. Nevýhodou metody je nepoužitelnost při výskytu menších, okem neviditelných, aglomerátů. V takovém případě se nabízí použití optického či elektronového mikroskopu, což jsou, zejména ve druhém případě, metody mnohem náročnější.

Další možností jsou metody spektroskopické, založené na interakci elektromagnetického záření s disperzí. Využít lze v tomto případě zejména UV/Vis spektroskopie – ta vyniká jednoduchostí, rychlostí a přesností měření – a náročnější Ramanovy spektroskopie. Zatímco první jmenovaná nabízí měřením světelné pohltivosti zjištění řady vlastností disperzí nanočástic (velikost částic, koncentraci roztoku, úroveň aglomerace, výskyt nečistot), z výsledků druhé metody lze odhadovat úroveň poškození částic vlivem příliš agresivní dispergace.

Měření pomocí laserových granulometrů umožňuje zjistit jak velikost shluků nanočástic, tak i jejich procentuální zastoupení ve vzorku. Nevýhodou může být nízký měřící rozsah daného přístroje. Pokud jsou použité nanočástice přibližně kulového tvaru, lze pro odhad úrovně dispergace použít i změření specifického povrchu, např. pomocí metody BET. Pro náročnost vyhodnocení a nepřesnosti při výskytu imperfekcí částic však tento způsob není doporučen.

Problematikou dispergace se bude dále zabývat experimentální část článku.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentu bylo ověřit možnosti dispergace uhlíkových nanotrubiček ve vodné suspenzi a dále v cementové maltě. Byl stanoven vliv přítomnosti a dávky nanočástic na mechanické vlastnosti malty. S tím souvisel návrh složení suspenze nanočástic, způsobu dispergace a metodiky měření kvality dispergace.

Použité materiály

Pro přípravu suspenze bylo použito předsměsi uhlíkových nanotrubiček

Graphistrength CW2-45 francouzské firmy Arkema. Ta se sestává ze 45 % z uhlíkových nanotrubiček (dále CNT) a 55 % povrchově aktivní karboxymethylcelulózy (dále CMC). Jako pojivová složka malty byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R dodaný firmou Českomoravský cement, a. s., závod Mokrá. Roli plniva zastával normalizovaný křemičitý písek CEN. Voda byla použita pitná z vodovodního řadu. Pro ověření stabilizačního účinku CMC byla k polovině suspenzí přidána ještě superplastifikační přísada Mapefluid N200 firmy Mapei v dávce 100 % hmotnosti CNT.

Použitá zařízení

K zařízením použitým pro dispergaci se řadilo magnetické míchadlo Variomag Monotherm a Ultrazvukový homogenizátor Bandelin Sonopuls HD 3200 se sondou KE 76. Úroveň dispergace byla měřena UV/Vis/NIR spektrofotometrem PerkinElmer LAMBDA 1050 a následně na ztvrdlé cementové maltě rastrovacím elektronovým mikroskopem TESCAN MIRA3 XM. Pro přípravu a zkoušení cementové malty byla použita zařízení dle ČSN EN 196-1 – Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti.

Složení záměsi

Dávka CNT byla zvolena 0,01 % hmotnosti cementu, což je hodnota relativně nízká. Někteří zahraniční autoři pracují s dávkami až 0,1 % hmotnosti cementu, nicméně bylo prokázáno, že s rostoucí dávkou se dispergace a stabilizace stává komplikovanější a výsledky mohou být paradoxně horší.

Nanotrubičky byly dispergovány

Tab. 1 Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku cementové malty ve stáří 7 a 28 dní a jejich procentuální změny ▮ Tab. 1 Bending and compressive strength of cement mortar at the age of 7 and 28 days and their percentage changes

Vzorek	pevnost v tahu za ohybu [MPa]		nárůst/pokles pevnosti* [%]		pevnost v tlaku [MPa]		nárůst/pokles pevnosti* [%]	
	po 7 dnech	po 28 dnech	po 7 dnech	po 28 dnech	po 7 dnech	po 28 dnech	po 7 dnech	po 28 dnech
Bez SP, 10 kJ	9,4	10,5	+1,4	+2,3	49,2	62,3	0,0	+3,8
Bez SP, 20 kJ	9,4	10,8	+1,6	+5,2	49,1	62,2	-0,2	+3,6
Bez SP, 30 kJ	9,5	10,4	+2,6	+1,4	49,5	63,6	+0,6	+6,1
Bez SP, 40 kJ	8,8	10,9	-5,5	+6,6	48,9	62,9	-0,6	+4,9
Se SP, 10 kJ	10,1	10,1	+13,0	+7,3	53,9	67,2	+3,4	+3,0
Se SP, 20 kJ	10,4	10,1	+16,7	+7,7	57,3	68,0	+10,0	+4,3
Se SP, 30 kJ	9,7	10,7	+9,2	+14,0	54,3	66,1	+4,2	+1,4
Se SP, 40 kJ	10,4	9,4	+16,9	+0,8	52,9	64,2	+1,6	-1,6

ve vodné suspenzi dodáním 10, 20, 30 a 40 kJ akustické energie. K polovině záměsi byla přidána výše zmíněná superplastifikační přísada.

Dávkování ostatních komponent cementové malty odpovídalo normalizovanému složení dle ČSN EN 196-1 – Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti.

Diskuse výsledků

V tab. 1 jsou uvedeny výsledky mechanických zkoušek cementové malty, procentuální nárůsty nebo poklesy pevností jsou vztaženy k referenčnímu vzorku vyrobenému pro každou sadu. Zkratka SP v označení vzorku znamená superplastifikační přísada a číslo vyjadřuje množství dodané dispergační energie.

Po ukončení dispergace byl z každé suspenze odebrán vzorek, zředěn na měřitelnou koncentraci a pomocí UV/Vis spektroskopie byla zjištěna tzv. absorbance – bezrozměrné číslo popisující úroveň absorpce elektromagnetického záření suspenzí. Toto měření je založeno na faktu, že čím jsou nanočástice lépe rozptýlené, tím je suspenze „neprůsvitnější“. Výsledky jsou patrné na obr. 3 a je zřejmé, že vzorek obsahující přidanou superplastifikační přísadu vykazoval obecně vyšší absorbanci – lepší stupeň dispergace.

Při pohledu na tab. 1, zobrazující vývin pevností v tahu za ohybu ve stáří 7 a 28 dní, je patrné, že vzorek obsahující přidanou superplastifikační přísadu vykazuje po 7 dnech vyšší nárůsty než ve 28 dnech. To může být způsobeno právě přítomností superplastifikační přísady, případně společným účinkem superplastifikační přísady a karboxymethylcelulózy. V každém případě nebyly 7denní pevnosti považovány za reprezentativní a jsou uvedeny pouze pro znázornění zmíněného jevu.

Při dispergaci je důležité, aby na jednu stranu došlo k co nejdokonalejšímu „rozmotání“ nanotrubiček a zároveň nedošlo k jejich degradaci při „přemíchání“ – energie, která se nespotřebuje pro dispergaci způsobuje lámání trubiček na velmi malé kousky. Tím se zvýší měrný povrch systému, zvolená dávka povrchově aktivní látky rázem nemusí stačit pro udržení stability a dojde k reaglomeraci. Takto vzniklá hnízda nanotrubiček se v matrici chovají jako filtry nepropouštějící cementové částice a tvořící tak jakési dodatečné póry.

Výsledky stanovení pevnosti v tahu

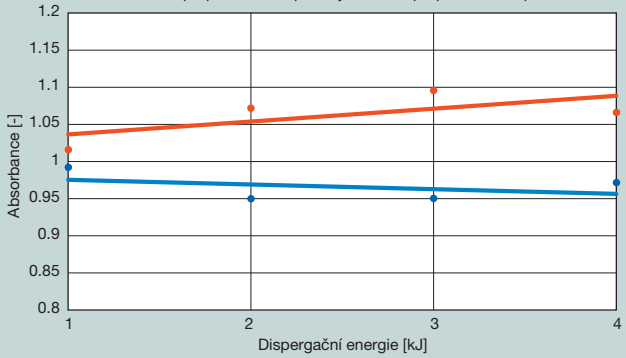
Obr. 2 Ultrazvukový homogenizátor včetně reakční rozetové nádoby [13] ▮ Fig. 2 Ultrasonic homogenizer with a reaction rosette vessel [13]

Obr. 3 Výsledky UV/Vis spektroskopie ▮ Fig. 3 Results of UV/Vis spectroscophy

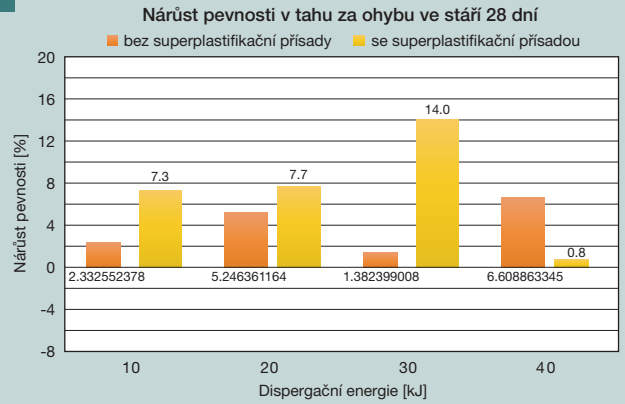
Obr. 4 Procentuální změna pevnosti v tahu za ohybu cementové malty vyztužené uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků ve stáří 28 dní ▮ Fig. 4 Percentage change in bending strength of cement mortar reinforced with carbon nanotubes against flexural strength of reference samples at the age of 28 days

Obr. 5 Procentuální změna pevnosti v tlaku cementové malty vyztužené uhlíkovými nanotrubičkami proti pevnosti v tlaku referenčních vzorků ve stáří 28 dní ▮ Fig. 5 Percentage change in compressive strength of cement mortar reinforced with carbon nanotubes against compressive strength of reference samples at the age of 28 days

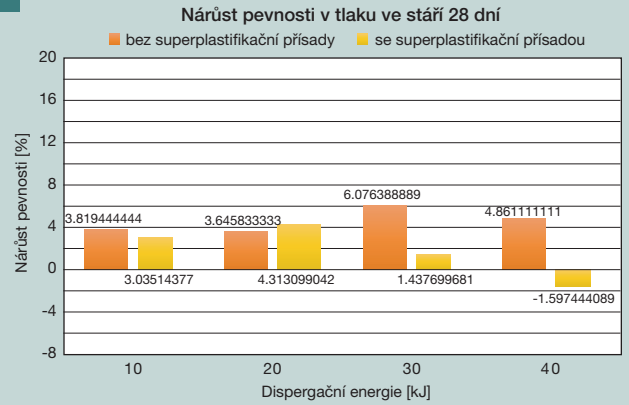
3



4



5



za ohybu ve stáří 28 jsou znázorněny na obr. 4. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při použití 30 kJ dispergační akustické energie s přidanou superplastifikační přísadou. Tato sada dosahovala obecně lepších výsledků a až u energie 40 kJ byla pravděpodobně dispergace přídavkem superplastifikační přísady usnadněna natolik, že došlo k polámání částic a následně aglomeraci. Množství proměnných, vstupujících pouze do přípravy disperze nanočástic je natolik vysoké, že lze jejich vlivům přisuzovat určitou statistickou „rozházenost" výsledků. Ve větším měřítku je ale zřejmé, že zvýšení podílu superplastifikační přísady vedlo ke zlepšení mechanických vlastností cementového nanokompozitu.

Pevnost v tlaku nepatří mezi vlastnosti, jejichž zlepšení by se primárně dosahovalo přídavkem uhlíkových nanotrubiček. Experimentálně ale bylo zjištěno, že k určitému zvýšení dochází. Tento fakt je připisován kombinaci třech jevů – zachycování části příčných napětí, vznikajících při tlakovém namáhání; vystupování části nanotrubiček jako nanofilleru, vyplňujícího jemnou pórovitost v cementovém kameni; modifikaci průběhu hydratace a vývoje C-S-H gelů vlivem přítomnosti ultrajemných částic. Výsledky jsou patrné na obr. 5, přičemž odchylky jsou opět připisovány stochastickému charakteru nanokompozitu.

ZÁVĚR

Ani stavební průmysl se nevyhnul trendu nanotechnologií – cestě, na jejímž konci stojí dle vědců jako Michio Kaku až utopicky znějící totální ovládnutí hmoty člověkem [14], kdy budeme schopní reorganizací atomů a molekul vyrobit cokoli z čehokoli. Každá cesta ale musí někde začít a cesta nanotechnologií začala teprve relativně nedávno.

Jako každá mladá vědní disciplína, i nanotechnologie se potýkají s řadou překážek. Mezi ty významnější se řadí především otázka toxicity a dostupnosti nanočástic a také otázka efektivity integrace částic do struktury nanomateriálu.

Jak je zřejmé z výsledků experimentu, nejkritičtějším místem je dispergace nanočástic. Množství proměnných, které vstupují do procesu výroby nanokompozitu, je značné – jedná se zejména o volbu typu a dávky nanočástic, typu a dávky povrchově aktivní látky a metody a intenzity dispergace. I následné zpracování kompozitu je často nutné mírně modifikovat od zavedených metod.

Ačkoli řada výzkumníků své cementové nanokompozity již takříkajíc „naladila", stále se jedná o značně empirické postupy. Právě tento empirismus je nutné, pro dokonalé pochopení chování materiálů na jejich nejelementárnější úrovni, minimalizovat.

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektu GAČR P104/15-23219S s názvem „Studium metod dispergace nanočástic, stanovení podmínek zamezení jejich opětovného shlukování pro aplikaci v cementových kompozitech".

Literatura:

[1] *Sičáková A.*. (2011): Nanotechnológie vo vývoji betónu, In: TZBportál [online] [cit. 2014-04-12] ***http://www.tzbportal.sk/beton-betonarky/nanotechnologie-vo-vyvoji-betonu.html***

[2] Feynman R. F (2000): In: ConVERTER [online], [cit. 2014-04-06] dostupné z ***http://www.converter.cz/fyzici/feynman.htm***

[3] *Pacheco-Torgal F., Jalali S.* (2011): Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. Construction and Building Materials, vol. 25, issue 2, s. 582–590, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.009, dostupné z: ***http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061810003764***

[4] *Pacheco-Torgal F., Miraldo S., Ding Y., Labrincha J. A.* (2013): Targeting HPC with the help of nanoparticles: An overview. Construction and Building Materials, vol. 38, s. 365–370, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.013, dostupné z: ***http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181200596X***

[5] *Sobolev K., Sanchez F., Flores I.* (2012): The use of nanoparticle admixtures to improve the performance of concrete, 12th Inter. Conf. on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, s. 455–469

[6] *Peyvandi A., Sbia L. A., Soroushian P., Sobolev K.* (2013): Effect of the cementitious paste density on the performance efficiency of carbon nanofiber in concrete nanocomposite. *Construction and Building Materials,* vol. 48, s. 265–269. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.094, dostupné z: ***http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813006132***

[7] *Farzadnia N., Abang Ali A. A., Demirboga R., Anwar M. P.* (2013): Effect of halloysite nanoclay on mechanical properties, thermal behaviour and microstructure of cement mortars, Cement and Concrete Research, vol. 48, s. 97–104. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.03.005, dostupné z: ***http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884613000598***

[8] *Al-Salami A. E., Morsy M. S., Taha S., Shoukry H.* (2013): Physico-mechanical characteristics of blended white cement pastes containing thermally activated ultrafine nano clays. Construction and Building Materials, vol. 47, s. 138–145. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.011, dostupné z: ***http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813004091***

[9] *Meng T., Yu Y, Qian X., Zhan S., Qian K.* (2012): Effect of nano-TiO2 on the mechanical properties of cement mortar. Construction and Building Materials, vol. 29, s. 241–245. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.047, dostupné z: ***http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811005964***

[10] *Li H., Xiao H., Ou J (2004):* A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. Cement and Concrete Research, vol. 34, issue 3, s. 435–438. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.08.025, dostupné z: ***http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603003065***

[11] *Jo B. W., Choi J. S., Kang S. W.* (2010): An Experimental Study on the Characteristics of Chemically Synthesized Nano-Cement for Carbon Dioxide Reduction. Advanced Materials Research, 148–149, s. 1717–1721. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.148–149.1717, dostupné z: ***http://www.scientific.net/AMR.148-149.1717***

[12] *Lin Z, Flores I., Sobolev K.* (2012): Nano-engineered cements with improved early strength. In: 4th Inter. Symp. on Nanotechnology in Construction, Greece, dostupné z: ***https://www.researchgate.net/publication/235978581_Nano-engineered_cements_with_improved_early_strength***

[13] Sodipro [online]. [cit. 2015-01-03], dostupné z: ***http://www.sodipro.fr/***

[14] Can Nanotechnology Create Utopia. ***Http://bigthink.com/*** [online]. 2012 [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: ***http://bigthink.com/dr-kakus-universe/can-nanotechnology-createutopia***

Bc. Martin Labaj
e-mail: labajm1@study.fce.vutbr.cz

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
tel: 541 147 508
e-mail: hela.r@fce.vutbr.cz

Ing. Tomáš Jarolím
tel: 541 147 468
e-mail: jarolim.t@fce.vutbr.cz

všichni: Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav technologie stavebních hmot a dílců
www.vubtr.cz