

Multifunkční cementové kompozity s uhlíkovými vlákny.

Josef Knězek¹

Abstrakt

Multifunkční cementové kompozity pro stavební a technické aplikace s technicky využitelnou úrovní elektrické vodivosti. Elektrická vodivost cementopískového kompozitu. Výsledky studia možného přínosu uhlíkových vláken pro elektrickou vodivost cementového kompozitu

Úvod

Stavební i ostatní technická praxe věnuje stále větší pozornost možnostem využití specifických multifunkčních kompozitů na bázi portlandského cementu. Nepochybně významným představitelem takových multifunkčních kompozitů jsou dosavadní výsledky celosvětového úsilí o souběžné dosažení jak příznivých mechanických vlastností v běžných podmínkách užití, tak i dosažení technicky využitelné úrovně elektrické vodivosti. [1,2,3,4,5].

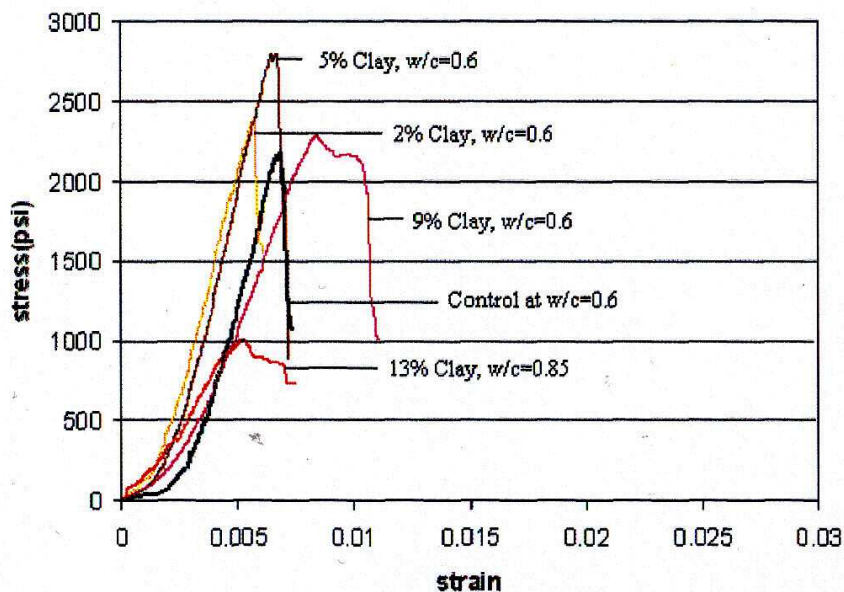
Pozornost je věnována jemnozrnným matricím na bázi portlandského cementu. Takové matrice umožňují v kombinaci s disperzní vláknovou výztuží vytvářet relativně subtilní stavební či technické prvky, které při relativně nízké hmotnosti operují s relativně nízkým podílem vláknové výztuže. Podle typu užitých vláken mohou výsledné kompozitní produkty vykazovat technicky zajímavé a v praxi dobře využitelné vlastnosti.

Existence přechodové zóny (ITZ) na rozhraní hydratujících cementových částic a povrchu křemičitých pískových výplní je spojena s charakteristickou vyšší koncentrací krystalů hydroxidu vápenatého a cca 3x vyšší pórovitostí proti běžné cementové matici. Zvýšená pórovitost ITZ – je s pojea s rizikem zvýšených transportních vlastností a časově proměnné vlhkosti s doprovodným efektem proměnlivé zvýšené elektrické vodivosti.

ITZ vzniká v celém rozsahu v praxi se uplatňujících vodních součinitelů ($v/c = 0,3$ až $0,6$), nemusí však být přítomna – či ji prakticky nelze prokázat – v případech, kdy jsou ve skladbě přítomny další extrémně jemné minerální příměsi (jako mikrosilika). Převládá názor, že tloušťka ITZ nepřesahuje úroveň $50 \mu\text{m}$ a zpravidla činí cca $(15-20)\mu\text{m}$. V daném místě se mění v závislosti na míře dokonalosti obalení výplní jednotlivými zrny cementu, užitém vodním součiniteli a přítomností dalších minerálních mikro- a submikro výplní. Zaplnění makropórů vodou či spíše koncentrovanými roztoky vznikajícími v rámci probíhající hydratace cementu může významně ovlivňovat elektrickou vodivost celého strukturního systému. [6,7,8].

Byly zveřejněny zajímavé výsledky experimentů [9] o možnostech potlačování mikropórovitosti struktury postupně se vytvářejícího cementového kamene aplikací nspecifikovaných jílovitých nanočástic. Dávkou 5 % jílu rozpraveného v záměsové vodě byla potlačena úroveň mikropórovitosti cementového kamene a dosaženo i podstatného zvýšení pevnosti v tlaku (obr.1).

¹KNĚZEK Josef, Ing.,Csc., Výzkumný ústav stavebních hmot,a.s., Hněvkovského 65, 617 00 Brno,
e-mail: knezek@vustah.cz



Obr.1: Vliv přidavku jílovitých částic [9] na pevnost cementu v tlaku

Vytvoření multifunkčního kompozitu na bázi cementové matrice vyžaduje jednak použití účinné elektricky vodivé složky, jednak co možná potlačení citlivosti cementové matrice na vlhkostní změny prostředí při minimalizaci přístupu vody a vlhkosti do otevřené struktury kompozitu. Snahy eliminovat zanedbatelnou elektrickou vodivost cementových kompozitních matic aplikací další elektricky vodivé složky mohou být orientovány různými směry. V tomto studijním pojednání je velká pozornost je věnována možnostem řešení této úlohy užitím elektricky vodivých nekovových vláken na bázi uhlíku při souběžném jejich využívání pro zabezpečování potřebné úrovně mechanických vlastností výsledného kompozitu. Toto úsilí se zatím může střetávat s komerční dostupností uhlíkových vláken, kdy jejich povrchová úprava je pojednána pro aplikace v polymerních maticích a není přihlíženo ke specifické cementových matic. Soudržnost samotných uhlíkových vláken s hutnou cementovou maticí byla deklarována [3] v úrovni cca 6 MPa. Uhlíková vlákna jsou zpravidla aplikována do cementové matrice ve formě disperzní výztuže, v konečné fázi pak nejčastěji jako elementární vlákna. Tím je ale limitován i jejich maximální objemový podíl ve výsledném jednotkovém objemu [4], nemá-li docházet při homogenizaci výsledné výrobní směsi k nadměrnému krácení vláken či vytváření nežádoucích shluků vláken, provázených ve svém důsledku tvorbou druhotné mikropórovitosti či dokonce snižování specifické výztužné způsobilosti vláken.

Realizace technického uplatnění specifických vlastností uhlíkových vláken v cementových kompozitech určených pro stavební a technické aplikace však zatím stále čeká „na svůj den“. Je to dáno kromě jiného jak jejich fakticky omezenou dostupností na trhu, tak i jejich cenou. Orientační cenové relace různých typů vláken z roku 2005 (viz tab.1) nejsou v současnosti příliš odlišné. Finanční náročnost uhlíkových vláken dosud přednostně uvažovaných při vytváření cementových kompozitů s významnou elektrickou vodivostí patří k nejvyšším. Aplikace uhlíkových vláken v cementové maticí proto vyžaduje efektivně využít celého komplexu jejich specifických vlastností fyzikálních i jmenovitě mechanických..

Předkládané pojednání shrnuje výsledky studia dostupných údajů o problematice elektrické vodivosti cementových kompozitů s disperzní výztuží z uhlíkových vláken a charakterizuje

vyšší elektrické vodivosti ITZ. V práci [7] jsou však ponechány poněkud stranou změny elektrické vodivosti v průběhu hydratace.

Tabulka 2: Výsledky měření elektrické vodivosti podle [7] v závislosti na objemovém podílu křemičitého písku – $S = 0,1$ až $0,5$

Time (h)	Conductivity $((\Omega\text{cm})^{-1})$					
	Paste	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1	0.010 89	0.009 58	0.007 63	0.006 74	0.005 42	0.004 44
24	0.001 75	0.001 55	0.001 34	0.001 13	0.000 92	0.000 75
72	0.000 88	0.000 79	0.000 63	0.000 63	0.000 44	0.000 36
168	0.000 66	0.000 63	0.000 48	0.000 48	0.000 34	0.000 28
336	0.000 56	0.000 51	0.000 41	0.000 35	0.000 29	0.000 23
772	0.000 50	0.000 44	0.000 34	0.000 30	0.000 24	0.000 20

Poznámka : : $(\text{Ohm.cm})^{-1} = \text{S/cm}$

Publikované výsledky měření elektrické vodivosti [7] však umožňují i odlišný přístup k vyhodnocení jejich experimentálních údajů, a to v závislosti jak na objemovém podílu jemnozrných křemičitých výplní (S_i), kde $i = 0$ až $0,5$, tak na úrovni hydratace, kterou lze formálně vyjádřit stářím zkušebních těles (T_i) v hodinách, kdy $i = 1$ až 772 . Výsledky odlišného přístupu vyhodnocení experimentálních údajů o elektrické vodivosti z tabulky 2 jsou ukázány na obr. 2 již jako normalizovaná elektrická vodivost v závislosti na objemovém podílu křemičité výplně S a stáří zkušebních těles T podle vztahu:

$$U_{SiTi} = U_{SoTi} - K_{Ti} S_i \quad (1)$$

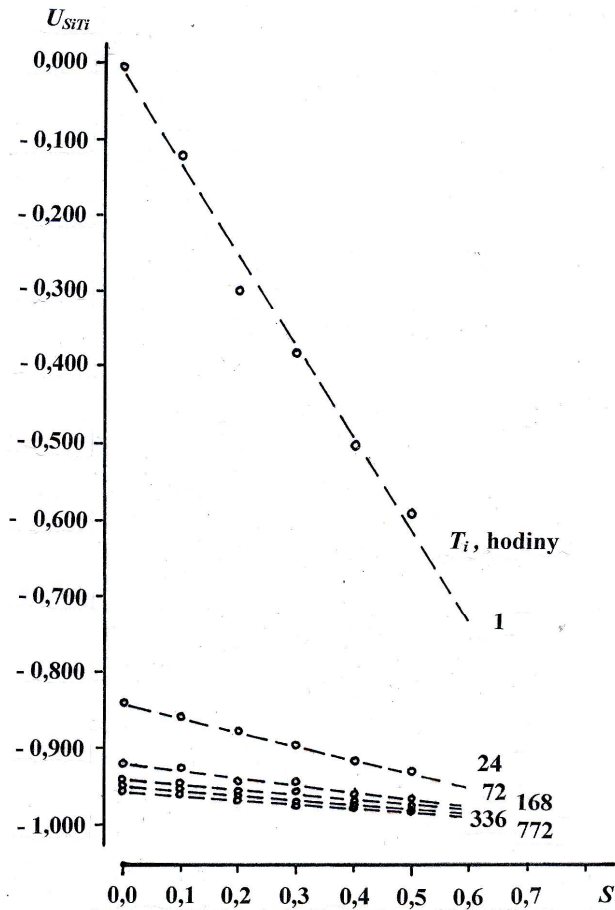
kde $U_{SiTi} = \left(\frac{V_{SiTi}}{V_{SoT1}} - 1 \right)$

V_{SiTi} ...elektrická vodivost cementopískové struktury při objemovém podílu křemičité výplně S_i a jejím stáří T_i v hodinách

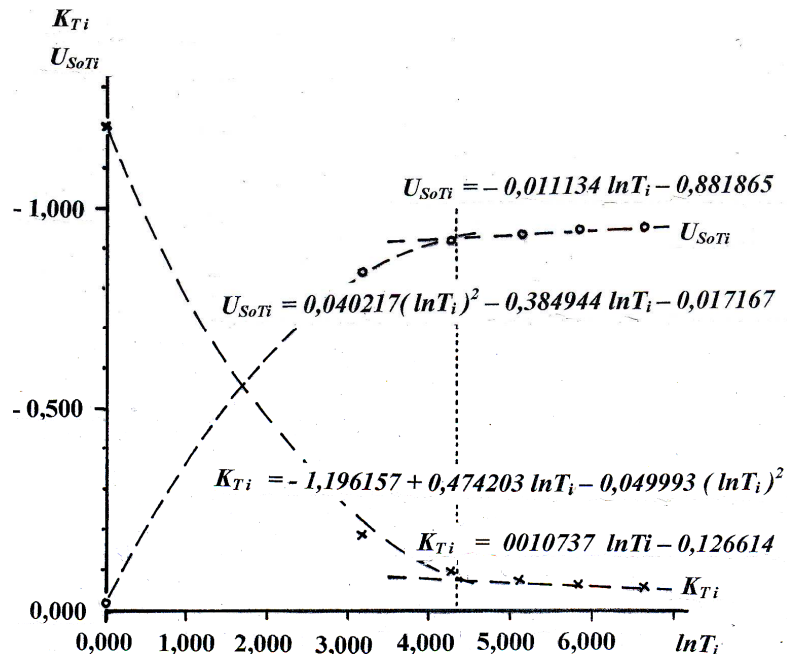
V_{SoT1} ...elektrická vodivost cementopískové struktury při objemovém podílu křemičité výplně $S_i = 0$ a jejím stáří $T_i = 1$ hodina.

Pro jednotlivé doby stáří T_i lze jednoduše vyčíslit regresní analýzou hodnoty koeficientů U_{SoTi} , které odpovídají vyrovnaným hodnotám normalizovaných elektrických vodivostí při nulovém obsahu křemičitých výplní, a směrnici K_{Ti} . Úlohou zůstává empirické vyjádření závislosti koeficientů U_{SoTi} a K_{Ti} na stáří zkušebních těles T_i . Jednotlivé hodnoty a jejich formální matematické vyjádření je ukázáno na obr.3.

Každý z koeficientů U_{SoTi} a K_{Ti} vykazuje obdobně dvě kvalitativně odlišná údobí, postihující jednak počáteční dobu tuhnutí a tvrdnutí a jednak následnou dobu postupného zrání vytvrdlé cementové matrice.



Obr. 2: Normalizovaná elektrická vodivost v závislosti na objemovém podílu křemičité výplně a stáří zkušebních těles



Obr.3: Závislosti koeficientů U_{SoTi} a K_{Ti} na stáří zkušebních těles T_i

Závislost koeficientu U_{SoTi} lze jednoduše vyjádřit v počáteční době tuhnutí až do stáří zkušebních těles do cca 76,3 hodin vztahem

$$U_{SoTi} = 0,040217(\ln T_i)^2 - 0,384944 \ln T_i - 0,017167, \quad (1.1a)$$

a ve stáří větším než 76,3 hodin vztahem

$$U_{SoTi} = -0,011134 \ln T_i - 0,881865. \quad (1.1b)$$

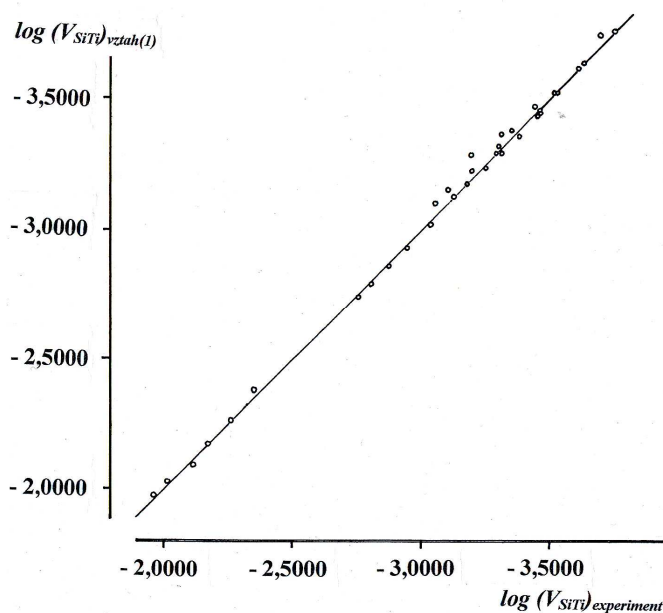
Závislost koeficientu K_{Ti} lze jednoduše vyjádřit v počáteční době tuhnutí až do stáří zkušebních těles do cca 76,2 hodin vztahem

$$K_{Ti} = -1,196157 + 0,474203 \ln T_i - 0,049993 (\ln T_i)^2, \quad (1.2a)$$

a ve stáří větším než 76,2 hodin vztahem

$$K_{Ti} = 0,010737 \ln T_i - 0,126614. \quad (1.2b)$$

Míra shody matematického zpracování experimentálních hodnot elektrické vodivosti z tabulky 2 podle vztahu (1) je ukázána v prostém srovnání na obr. 4. (praktických důvodů jsou všechny hodnoty vyjádřeny v dekadických logaritmech).



Obr. 4: Míra shody matematického zpracování experimentálních hodnot elektrické vodivosti z tabulky 2 podle vztahu (1)

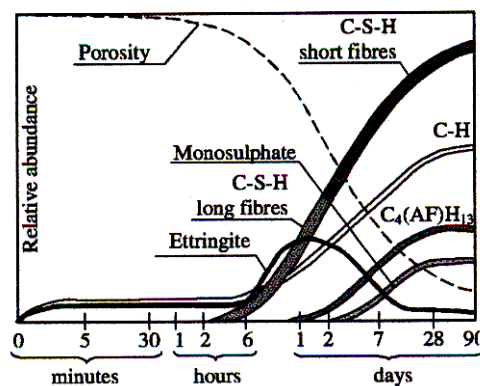
Pozornost zasluhuje přechodový stav zkušebních vzorků při jejich stáří cca 76 hodin. V tomto stáří bylo v rámci popisovaných experimentů zřejmě dosaženo perkolačního prahu elektrické vodivosti, kdy v dosavadním prostředí již pomíní výrazný vliv elektrické vodivosti přítomných kapalných fází a začíná se výrazně uplatňovat extrémně nízká hodnota elektrické vodivosti přítomných křemičitých výplní a vytvrdlých hydratačních produktů. Představu o rozdílech v elektrické vodivosti několika vybraných látek poskytuje tabulka 3.

Tabulka 3 Příklady elektrické vodivosti vybraných látek

Elektrická vodivost látky	S/cm
Křemen	$8 \cdot 10^{-15}$
absolutně čistá voda	$5,5 \cdot 10^{-8}$
technická destilovaná voda	$(2 \div 8) \cdot 10^{-6}$
dobrá pitná voda	$5 \cdot 10^{-5}$
hydratovaný cement	$8 \cdot 10^{-4}$
kaše PC při v/c= 0,40 při 20⁰C ve stáří 1 hodiny	$1,1 \cdot 10^{-2}$
0,1M roztok KCl při 20 ⁰ C	$1,167 \cdot 10^{-2}$
mořská voda	$5,3 \cdot 10^{-2}$
0,5M roztok NaOH	$1 \cdot 10^{-1}$
Šungit (grafit)	$1,5 \cdot 10^1$
grafit	$(1,6 \div 33) \cdot 10^1$
uhlíkové vlákno	$(7 \div 8) \cdot 10^2$
uhlíkové nanovlákno	$\sim 1 \cdot 10^4$

Srovnáme-li charakteristiky procesu hydratace portlandského cementu již od ranných stádií, projevuje se nepochybná kvalitativní shoda s časovým rozvojem hodnot elektrické vodivosti, byť v poměru nepřímé úměrnosti (Obr.5.)

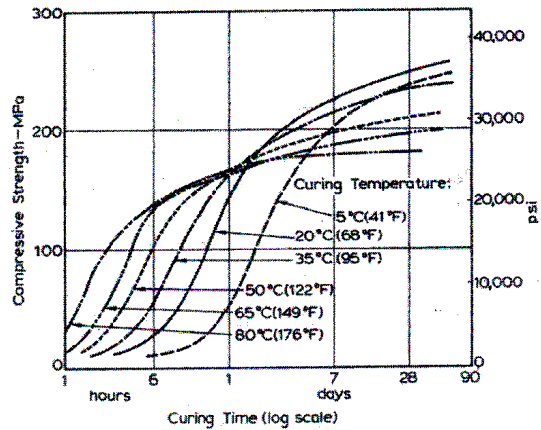
Obr. 5.:Poměrové vyjádření hlavních složek mikrostruktury v průběhu hydratace pasty portlandského cementu. [10]



Již na počátku styku cementových zrn s vodou reaguje podstatná část C_3S za vzniku hydrosilikátového gelu a krystalického portlanditu při souběžné reakci C_3A za přítomnosti sádrovce na hexagonálně krystalický ettringit, který přechází postupně na monosulfát. Hydratační reakce C_3S se postupně dále rozvíjí za vzniku dlouhovláknitého kalciumhydrosilikátu, při němž postupně narůstají krystalky portlanditu, který posléze zaujímá 20 až 25 % z objemu pevné fáze hydratované cementové pasty. Tyto procesy jsou spojeny s nárůstem měrného povrchu systému až o 2 řády. Vznikající struktura (charakter a rozsah pórovitosti) je při tom významně ovlivněna úrovní vodního součinitele a teplotou.(Obr. 6.) Prorůstáním krystalů hydratačních produktů v průběhu cca 12 až 24 hodin nastává přibližování a následné propojování cementových zrn. V následujícím prakticky neohrazeném období nastupuje hydratace ferritové fáze a probíhá hydratace C_2S .

Obr. 6 : Vliv teploty na časový rozvoj a úroveň pevnosti v tlaku portlandského cementu [11]

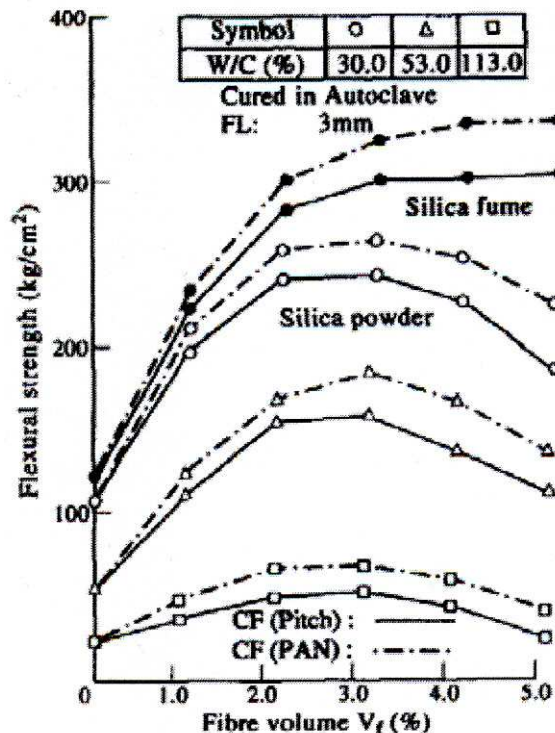
Lze soudit, že právě období intenzivního propojování krystalů hydratačních produktů cementu s jeho jednotlivými zrny a s částicemi silikátových výplní odpovídá perkolačnímu prahu elektrické vodivosti, který v uvedeném příkladu byl zjištěn ve stáří cementopískové malty cca 76 hodin.



Relation between compressive strength and curing time of neat cement at different curing temperatures (Neville 1996)

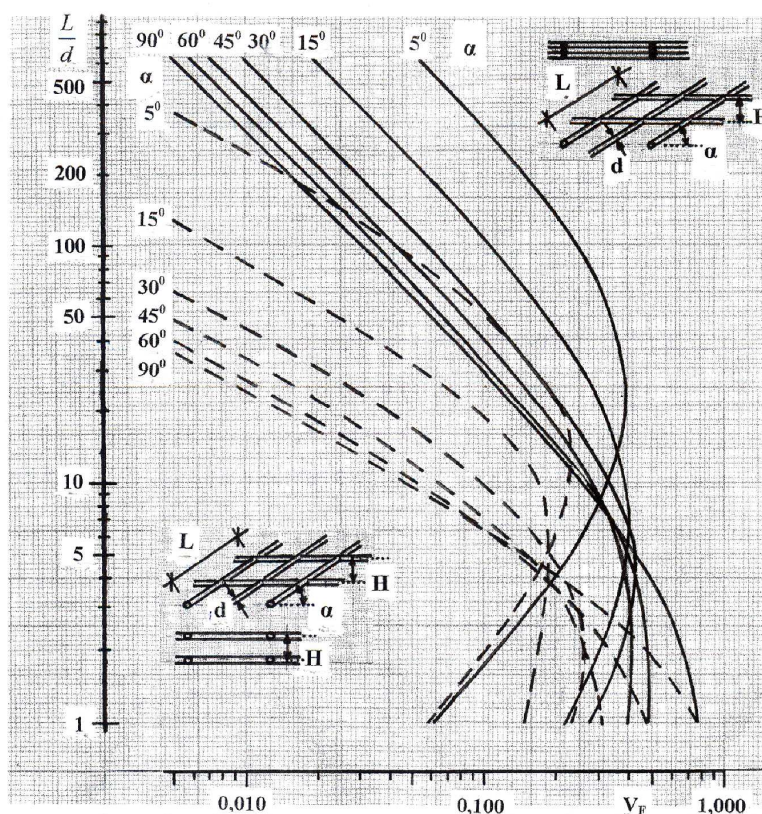
Uhlíková vlákna jako disperzní výztuž cementové matrice.

Studijní rozvahy o možném přínosu uhlíkových vláken jako disperzní výztuže jemnozrnných cementových matric lze opírat o řadu dostupných prací. Souhrnnou rámcová představa o přínosech narůstajících objemových podílů dvou základních typů uhlíkových vláken (Pitch, PAN) délky 3 mm jako disperzní výztuže cementových matric (včetně vlivu přínosu jemných křemičitých výplní) pro pevnost za ohybu je ukázána na Obr. 7, jak ji uvádí [12]. Zvolené rozdílné úrovně vodního součinitele (tj. rozdílné úrovně tekutosti kompozitní směsi) nedokázaly překlenout vliv zvýšených objemových podílů vláken (s výjimkou aplikování mikrosiliky) na kompaktní uspořádání struktury výsledného kompozitu natolik, že zvýšení objemového podílu vláken za 2% na 3% objemová již nevedlo ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu. Aniž by to bylo v [12] uváděno – lze soudit, že ve výsledné struktuře kompozitu se již pak začíná rozvíjet přídatná mezerovitost.



Obr. 7: Vliv objemových podílů dvou základních typů uhlíkových vláken (Pitch, PAN) délky 3 mm jako disperzní výztuže cementových matric na pevnost za ohybu [12].

Dříve navržený model disperzní vláknové struktury [13.] je ukázán na obr. 8 pro 2 případy, kdy jsou vlákna definované štíhlosti : jednak nahodile orientována ve vrstvách se vzájemným kontaktem (plné křivky),jednak nahodile orientována ve vrstvách s tím, že vzdálenost vrstev i vzdálenosti souběžných vláken ve vrstvách je shodná a umožňuje pohyb maximální částice matrice. Experimentálně bylo prokázáno, že variantě kontaktního uspořádání modelu při úhlu $\alpha = (45 \text{ až } 60)^\circ$, jak je svírající osy vláken, odpovídá stochastické kontaktní ukládání vláken při experimentálním stanovení jejich sypané hmotnosti, kdy se uplatňuje na kontaktech vláken tření, elektrický náboj a další fyzikální jevy. Jak bylo v [13] ukázáno, ve vodním prostředí či za přítomnosti dalších vhodných složek však lze dosahovat možnosti zapracování i podstatně vyšších objemových podílů disperzních vláken, které formálně mohou odpovídat i hodnotám modelových úhlů $\alpha \sim (5 \div 15)^\circ$. Model umožňuje základní úvahy, experimentální ověřování reálných vláknocementových směsí je nezbytné.



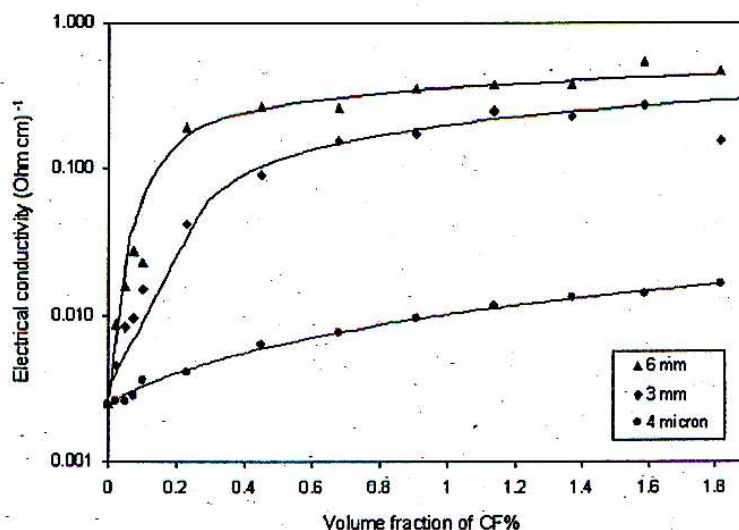
Obr. 8: Model disperzní vláknové struktury [13]

Lze soudit, že štíhlostní poměr užitých uhlíkových vláken (L/d) v práci [14] se pohybuje v úrovni cca 200 až 300. Z modelového řešení na obr.8. lze soudit, že objemový podíl elementárních uhlíkových vláken, která jsou prakticky ve vzájemném kontaktu při stochastickém uspořádání za sucha, se prakticky pohybuje v oblasti cca (1,3 až 2,2) % objemových., ve vodním prostředí v oblasti cca (4 až 15) % objemových. Vzájemným dotykem uhlíkových vláken by měl být překonán perkolační práh elektrické vodivosti cementového kompozitu jako takového.

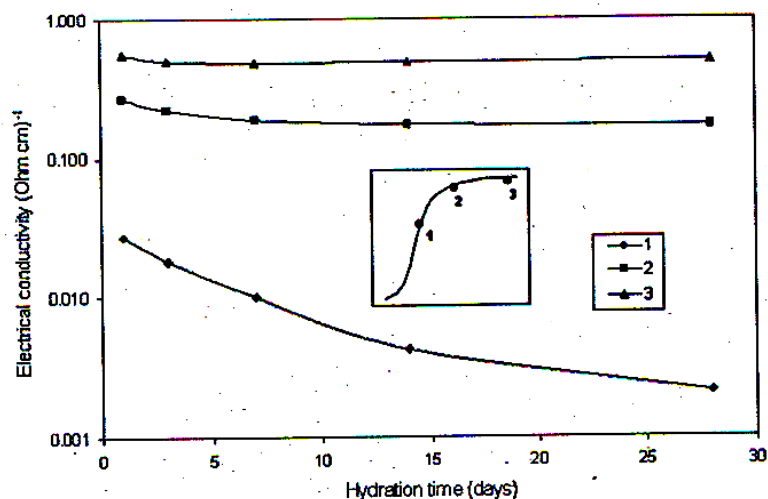
Elektrická vodivost cementové matrice s disperzními uhlíkovými vlákny.

Podrobné studium výsledků experimentů v práci [14], pojednávající o vlivu délky a obsahu uhlíkových vláken definované jakosti na elektrickou vodivost jemnozrnného cementového

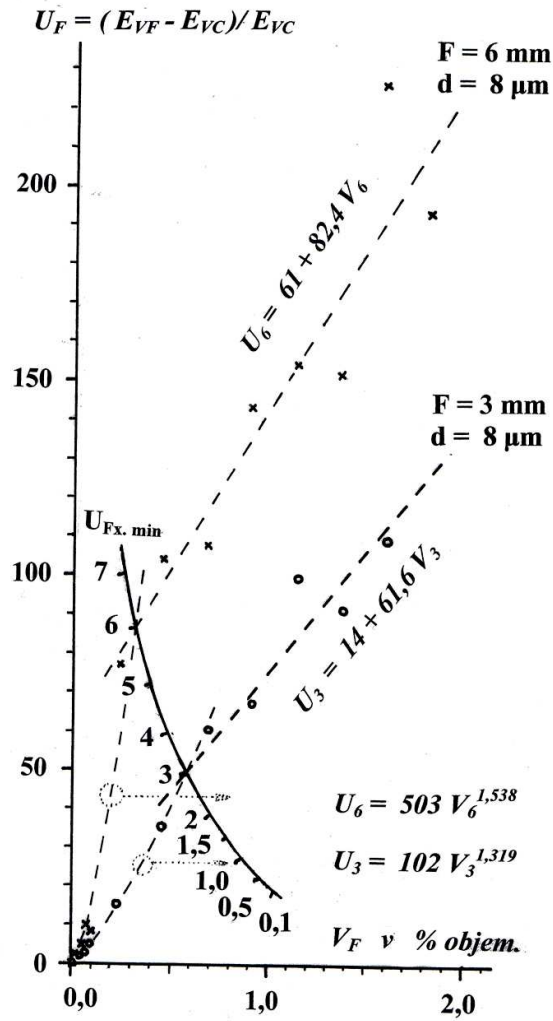
kompozitu ve stáří 1 dne (obr.9) a o souvislosti elektrické vodivosti tohoto kompozitu se stářím zkušebních těles (obr. 10) při třech objemových podílech uhlíkových vláken délky 3 mm, umožnilo s využitím modelové skladby kontaktní vláknové struktury [13] zpracovat odhady percolačního prahu elektrické vodivosti dané varianty a navazující souvislosti. Výsledek matematického zpracování experimentálních údajů z obr.9 je ukázán na obr.11., obr. 12. a obr. 13.



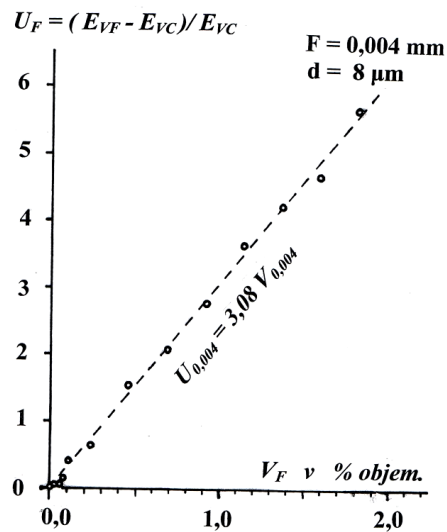
Obr. 9: Vliv obsahu C-vláken různých délek po 1- denní hydrataci na elektrickou vodivost cementového kompozitu podle [14]



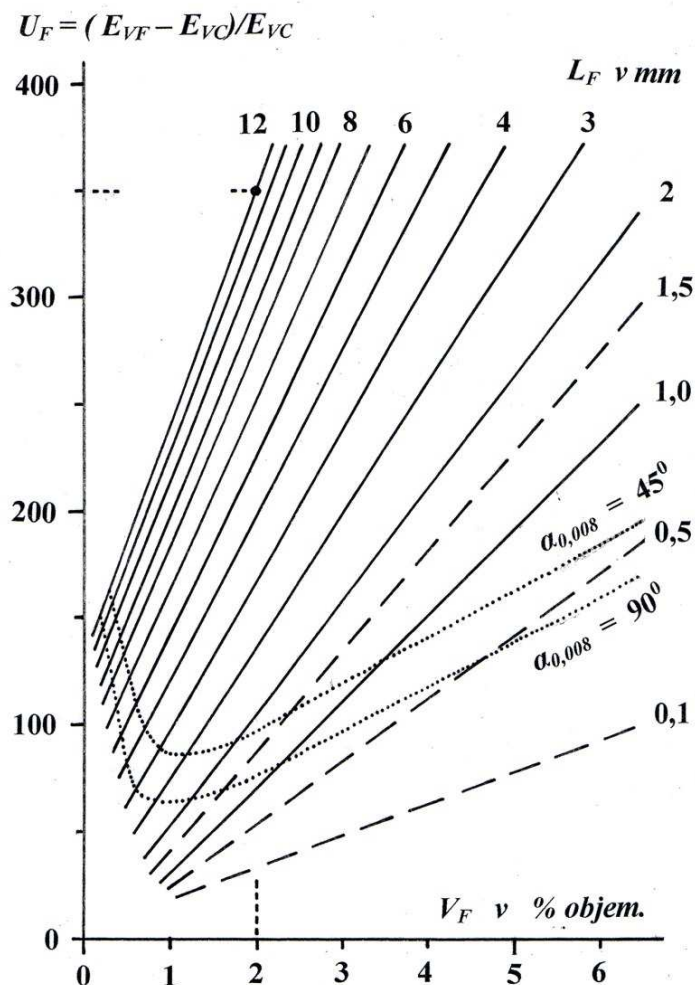
Obr. 10: Vliv doby hydratace cementového kompozitu s podílem 3 mm C-vláken v % objemových: 1-0,075, 2-0,45, 3-1,6 na elektrickou vodivost podle [14]



Obr. 11: Vyhodnocené odhady souvislost elektrické vodivosti cementového kompozitu [14] s obsahem uhlíkových vláken o délce 3 a 6 mm ve stáří 1 den..
Odhad polohy percolačního prahu elektrické vodivosti – $U_{F_x, \min}$.



Obr. 12: Vyhodnocená souvislost elektrické vodivosti cementového kompozitu [14] s obsahem uhlíkových vláken o délce 0,004 mm ve stáří 1 den



Obr. 13: Vyhodnocený odhad závislosti elektrické vodivosti cementového kompozitu [14] na délce a obsahu uhlíkových vláken.nad úrovní pravděpodobného perkolačního prahu ve stáří 1 den.

Akceptujeme-li nejnejpříznivější podmínky tvorby vláknové struktury z hlediska dosažitelné technicky efektivní pevnosti v tahu za ohybu objemový podíl uhlíkových vláken v úrovni cca 2 % objemových, pak lze očekávat (podle obr. 13) při délce vláken 3 mm elektrickou vodivost kompozitu ve stáří 1 dne v úrovni cca 130-ti násobku elektrické vodivosti cementové matrice a po dosažení stáří 1 měsíce asi cca 2500-násobek elektrické vodivosti cementové matrice.

Akceptujeme-li modelové uspořádání struktury kompozitu s disperzní vláknovou výztuží při nejnejpříznivějších podmínkách tvorby vláknové struktury podle obr. 8 pro obvyklou komerční délku uhlíkových vláken cca 10 mm, kdy štíhlostní poměr elementárních vláken ve výchozím stavu se pohybuje v oblasti cca 600 až 800, pak technicky efektivní podíl uhlíkových vláken ve výsledné struktuře podle obr. 8. se bude pohybovat v oblasti cca (0,6 až 1,0) % objemových. V tom případě podle obr. 11. při délce vláken ve výchozím stavu cca 10 mm dosáhne elektrická vodivost kompozitu ve stáří 1 dne úrovně cca (170 až 220)-ti násobku elektrické vodivosti cementové matrice a po dosažení stáří 1 měsíce asi cca (3400 až 4400)-násobek elektrické vodivosti cementové matrice.

Nelze však vyloučit, že v průběhu homogenizace směsi s uhlíkovými vlákny délky 10 mm může poklesnou jejich štíhlost z výchozího stavu na cca poloviční úroveň, tj. na hodnotu cca 300 až 400. Pak technicky efektivní podíl uhlíkových vláken ve výsledné struktuře při nejnejpříznivějších podmínkách tvorby vláknové struktury poklesne do oblasti cca (1,5 až 1,7) % objemových. V tom případě při délce vláken cca 5 mm dosáhne elektrická vodivost kompozitu podle obr. 13 ve stáří 1 dne úrovně cca (160 až 180) násobek elektrické vodivosti cementové matrice a po dosažení stáří 1 měsíce asi cca (3200 až 3600)-násobek elektrické vodivosti cementové matrice.

Řešení cementové matrice s podílem uhlíkových vláken v existujícím komerčním provedení při délce $L_C \leq 0,5$ mm již musí respektovat vhodnou úroveň tloušťky C-vláken. Při komerčně potenciálně dostupných tloušťkách elementárních uhlíkových vláken v rozpětí zpravidla (10 až 18) μm představují $L_C = 0,5$ mm již štíhlostní poměr (L/d) v rozpětí hodnot 50 až 28. Technicky efektivní podíl těchto krátkých uhlíkových vláken pro dosažení optimálního mechanického vyztužení výsledné struktury při nejnejpříznivějších podmínkách tvorby vláknové struktury se bude pohybovat někde v oblasti cca (7 až 14) % objemových. V tom případě při délce vláken cca 0,5 mm dosáhne elektrická vodivost kompozitu ve stáří 1 dne úrovně cca (190 až 370) násobek elektrické vodivosti cementové matrice a po dosažení stáří 1 měsíce asi cca (3800 až 7400)-násobek elektrické vodivosti cementové matrice.

Z uvedených případů vyplývá, že podíl násobku zvýšení elektrické vodivosti cementového kompozitu s uhlíkovými vlákny proti samotné cementové matrici, připadající na objemovou jednotku uhlíkových vláken, výrazně narůstá s rostoucí délkou vláken. Rozhodně se tento jev projeví při posuzování ekonomické stránky.

Závěr.

Studium zveřejněných experimentálních výsledků umožňuje konstatovat, že dosavadní poznatky o stavu řešení elektricky vodivého cementového kompozitu směřují k variantám jemnozrnných kompozitů, kdy běžné uživatelské nároky mohou rozhodnout otázku vhodnosti užití vláknové výztuže. Užití jakýchkoliv vláknových složek významně ovlivňuje tvorbu výsledné vláknocementové struktury multifunkčního kompozitu. Jemnost základní pojivové složky – portlandského cementu – se sama o sobě blíží naplnění podmínek pro vyhovění potřebám skladebnosti strukturotvorných částic. Účinný podíl dalších mikronových a submikronových částic ve skladbě kompozitu může být pro konkrétním řešení kompozitu velmi významné. Analýza problematiky elektrické vodivosti cementových kompozitů ukázala na potenciál omezování otevřené struktury z hlediska omezování vnějších vlivů vlhkosti a vody i v přechodových zónách (ITZ), jak mezi hydratačními produkty cementu a křemičitými výplněmi, tak mezi těmito a povrchem uhlíkových vláken, který může být významně ovlivňován jejich reálnou povrchovou úpravou.

Studijní poznatky upozorňují na výhodnost řešení elektrické vodivosti cementových kompozitů aplikací vláknových složek, způsobilých významně vytvářet jak úroveň mechanických vlastností, tak i elektrickou vodivost kompozitu jako celku a poskytují možnost základní orientace pro řešení multifunkčních cementových kompozitů s technicky využitelnou elektrickou vodivostí. Uváděné konkrétní vztahy poskytují jen rámovou představu, vlastní řešení kompozitu musí být následně postaveno na průkazných experimentech

Poděkování

Tento příspěvek byl zpracován s využitím poznatků z řešení projektu MŠMT ČR 1M06005 – CIVAK a MPO ČR reg.č. FT-TA3/027.

Literatura

1. Banthia N., Djeridane S., Pigeon M.: Elektrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements, *Cement and Concrete research*, Vol.22, 1992, pp. 804-814.
2. Pu-Woei Chen, Chung D.D.L.: Carbon fiber reinforced concrete as an intrinsically smart concrete for damage assessment during static and dynamic loading, *ACI materials Journal*, July-August 1996, pp. 341-350.
3. Fu X., Chung D.D.L.: Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced Mostar, *Cement and Concrete Research*, Vol.27, 1997, No.9, pp.1343-1318.
4. Salem Th.M.: Electrical conductivity and rheological properties of ordinaty portland cement-silica fume and kalcium hydroxide-siklica fume pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, Issue 9, September 2002, pp. 1473-1481.
5. Principallo A., van Breugel K., Levita G.: Influence of aggregate on the Electrical conductivity of portland cement concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 11, November 2003, pp. 1755-1763.
6. Bentz D.P., Hwang J.T.G., Hagwood C., garboczi E.J., Snyder K.A., Buenfeld N., Scrivener K.L.: Interfacial zone percolation in concrete: Effect of interfacial zone thickness and aggregate shape, *Materials Research*, Pittsburg, 1995, pp.437-442.
7. Shane J.D., Mason Th.O., Jennings H.M., Garboczi E.J., Bentz D.P.: Effect of the interfacial transition zone on the conductivity of portland cement mortars, *J. Am. Ceram. Soc.*, 83, 2000, pp.1137-1144.
8. Nemati K.M., Gardoni P.: Microstructural and statistical evaluation of interfacial zone percolation in concrete, *Strength, Fracture and Complexity*, 2005, pp.191-197.
9. Birgisson B.: Nanomodification of cement paste to improve bulk properties of concrete, *National Science Foudation Workshop on Nanomodification of cementitious materials*, University of Florida, August 2006.
10. Lochem F.W., Richartz W., Sprung S.: Erstarren von zement, *zement Kalk Gips*, 1976, pp.435-442.
11. Li Q.: The Effect of moisture content on the tensile strength properties of concrete, Thesis for the degree of Masters of Engineering, University of Florida, 2004.
12. Zheng Z., Feldman D.: Synthetic fiber-reinforced concrete, *Prog. In Polym. Science*, Vol.20, 1995, pp.185-210
13. Knězek J., Čechmánek R.: On question of structure formation of cement composites with disperse fibre reinforcement, 12th INTERNATIONAL CONFERENCE, Ecology and new building materials and products, Telč, 3.-5.6.2008, pp.217-220, + CD.
14. Chiarello M., Zinno R.: Electrical conductivity of self-monitoring CFRC, *Cement & Concrete Composites*, 2005, pp.463 – 469.