

ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC) MANUFACTURING END VERIFICATION

L. Kopecký,¹ P. Kabele,² L. Novák³

Summary: *Parameters of Engineered cementitious composites (ECC) particularly weathered, may be affected its physical and mechanical properties. Comparative testing the influence of the fibres - ductility in differently chemical loaded specimens.*

1. Úvod

Česká republika se řadí mezi přední producenty popílku, které vznikají jako důsledek spalování různých druhů fosilních paliv nebo odpadů. Statistika dokonce hovoří o Česku jako o zemi s největší produkcí popílku v přepočtu na jednotku plochy i na počet obyvatel. Prioritou dnešní společnosti je snaha o maximální ochranu životního prostředí a z toho plynoucí zpracování odpadů. Jednou z možností racionálního způsobu užití popílku je jeho přidávání do betonů nebo kompozitních materiálů na bázi cementu. Engineered cementitious composites (ECC) je vláknocementový kompozit, který lze s úspěchem využít právě pro tyto účely. Popílek tvoří skoro 35 % obsahu a umožňuje velice dobře zhodnotit popílek v materiál s velmi zajímavými a žádanými vlastnostmi.

2. Vláknocementový kompozit

Zlepšení vlastností cementové matrice přidáním vláken je stará metoda. Dobré vlastnosti měli kompozity s azbestovými vlákny, v současné době se od jejich používání ustupuje neboť vlákna azbestu jsou zdravotně závadná. Dnes se používá mnoho nových druhů vláken např. skleněná, ocelová, polypropylénová, polyvinilalkoholová a další. Vlastní vyztužení lze provádět pomocí různých typů sítí, svazků nebo volným rozptýlením dlouhých či krátkých vláken.

Engineered cementitious composites (ECC) je materiál vyvíjený prof. Li z University of Michigan s cílem zdokonalit lomovou odolnost materiálů na bázi cementu. Jedním ze způsobů,

¹ RNDr. Lubomír Kopecký, České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra mechaniky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel. +420 224 35 48 23, e-mail lubomir.kopecky@fsv.cvut.cz

² Doc. Ing. Petr Kabele, Ph.D., České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra mechaniky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel. +420 224 35 44 85, e-mail petr.kabele@fsv.cvut.cz

³ Ing. Luděk Novák, České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra mechaniky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel. +420 224 35 44 98, e-mail novakl@mk.cvut.cz

jak vylepšit odolnost těchto materiálů, je přidání malého množství (2 – 3 % celkového objemu) krátkých vláken nebo drátků do cementové směsi. Lomové chování cementové malty bez vláken lze charakterizovat jako křehké. To znamená, že po vzniku trhliny materiál okamžitě ztrácí integritu a není schopen přenášet tahová napětí kolmo k trhlíně. Přidáním vláken je obvykle dosaženo takzvané kvazikřehkosti. Pevnost takového kompozitního materiálu se oproti samotné matici téměř nezmění. Pokud však vznikne trhlinka, vlákna ji překlenou (tzv. bridging) a zajišťují tak přenos tahových a případně smykových napětí. V důsledku vytahování vláken z matrice přenesené tahové napětí obvykle klesá. Toto tahové změkčení má na kompozitu s rozptýlenými trhlínami následek, že velmi brzy dochází k lokalizaci porušení do několika poměrně velkých trhlin. Tahové a lomové vlastnosti vláknocementových kompozitů však mohou být radikálně zlepšeny, pokud jsou vlákna schopna přenášet vzrůstající napětí po vzniku trhliny.

Na matici ECC materiálu je kladeno mnoho protichůdných požadavků, které jsme schopni docílit pouze za pomoci matrice, pro tento účel navržené. Musí být v mikroměřítku velmi kompaktní, aby dokázala využít maximálně tahovou pevnost vláken. Zároveň však v makroměřítku oslabená vhodně velkými póry a přípravou shodnou s ostatními materiály na bázi cementu. Ukazuje se nejdůležitější jsou póry v rozmezí 0,1 – 0,7 mm. Tato velikost oslabí matici makroskopicky a umožňuje přerozdělení napětí a zároveň zlepšuje zpracovatelnost směsi.

	Cement	Popílek	Písek
Objemové díly	1	1, 2	0, 8

Tabulka 1: Poměr jednotlivých složek v ECC

ECC je tvořeno cementem, popílkem a pískem. Poměr objemů jednotlivých složek je uveden v tabulce 1. Vodní součinitel se pohybuje okolo $w = 0,55$. Vzhledem k vysokému podílu jemných složek se jedná o relativně malý vodní součinitel. Dosažení dobré zpracovatelnosti je náročné na použitý materiál. Je nutné použít kvalitní superplastifikátor na bázi polykarboxylátů a optimalizovat křivku zrnitosti jemných složek.

Popílek je produktem spalování práškového antracitu, černého či hnědého uhlí a je zachycován v elektrostatických nebo mechanických odlučovačích. Pro použití v ECC je nejvhodnější popílek s malým obsahem vápených složek a s co nejmenší variabilitou. Z tohoto pohledu je nejvhodnější popílek z černého uhlí. V České republice vzniká 80 % popílku z hnědého uhlí kde je rozptýl větší, proto je třeba pečlivě kontrolovat vstupní vlastnosti. Jako naprosto nevhodný je popílek vznikající fluidním spalováním při teplotách kolem 800 – 900°C.

3. Výsledky pullout testu

Pro posuzování vlastností materiálů je důležité znát jejich chování nejen během přípravy a zpracování, ale také celé doby životnosti. ECC svojí schopností přenášet až 5% protažení je vhodné pro opravy konstrukcí namáhaných velkými deformacemi jako jsou opravy dálnic, mostů, opěrných konstrukcí. Při používání na takto exponovaných místech je nutné znát chování materiálu při běžném provozu. Sem patří i zimní údržba s posypem solí a přirozené stárnutí.

Pro posouzení těchto vlivů se provádí dlouhodobé testy. Jako zásadní pro správné chování ECC je přenos napětí z vlákna do matrice přes přechodovou vrstvu. Oslabení přechodové vrstvy má za následek znehodnocení celé konstrukce. Ke sledování změn na přechodové vrstvě jsme



Obrázek 1: Vzorek připravený k testu

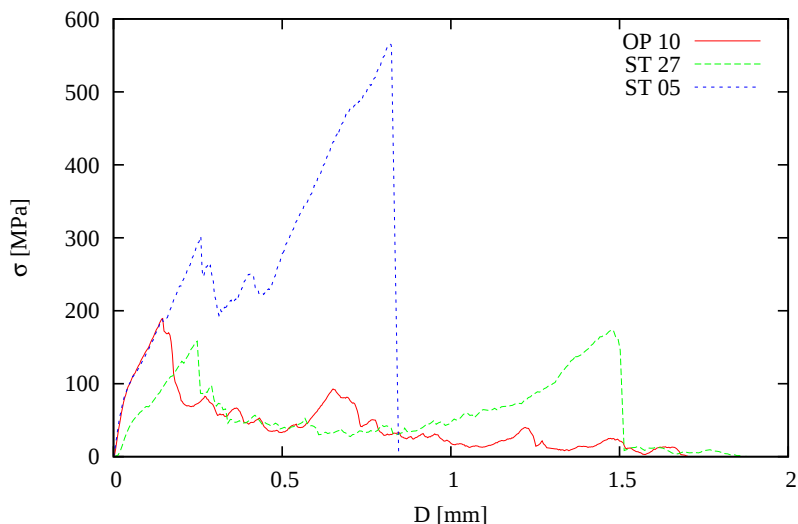
prováděli pullout test na vzorcích vystavených působení různých druhů solí. Tato zkouška spočívá v zabetonování jednoho vlákna do cementové matrice a jeho vytažení pomocí řízené deformace. Z tohoto testu jsme schopni učít základní charakteristiky pro výpočet chování vlákna. Zároveň je vlákno a jeho soudržnost respektive jeho spolupůsobení s matricí limitujícím faktorem správného chování kompozitu jako celku.

Pro vlastní test jsme připravili matrici s vodním součinitelem $w = 0,65$ taková to matrice není tak hutná jako matrice s vodním součinitelem $w = 0,55$. To má za následek rychlejší degradaci a tím i rychlejší průběh testu. Celkem jsme testovali čtyři sady vzorků po třiceti vláknech.

Jak je vidět v grafu na obrázku 2 tak při použití různých typů matrice může dojít ke čtyřem druhům chování přechodové vrstvy.

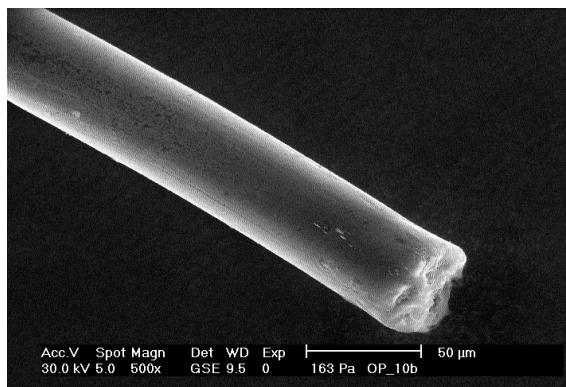
1. Matrice je slabá a vlákno je velmi rychle uvolněno. Nedochází k přerozdělení napětí a krátké lokalizaci se vytvoří jediná marginální trhlinka. V grafu na obrázku 2 se jedná o vlákno ST 27.
2. Matrice má správné vlastnosti ⁴ a dochází ke tvorbě rozptýlených trhlin.

⁴ není v grafu na obrázku 2 obsažena



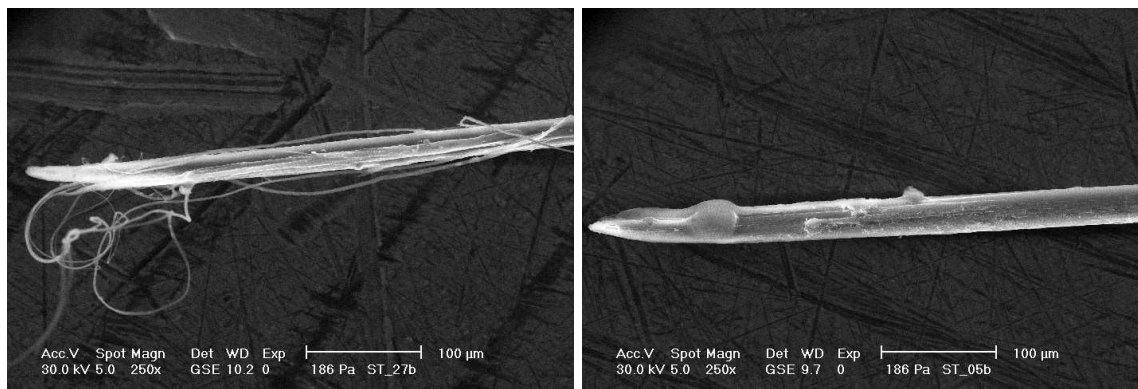
Obrázek 2: Grafy různě kvalitních matic.

3. Matrice je pseudopevná . Matrice je slabá a obsahuje ostré kamenivo. V takovéto matici může docházet k částečnému zpevnění. V grafu na obrázku 2 se jedná o vlákno OP 10.
4. Matrice je skutečně příliš pevná. V grafu na obrázku 2 se jedná o vlákno ST 05.



Obrázek 3: Vlákno ve slabé matici.

Tuto skutečnost nám potvrzují obrázky pořízené v elektronovém mikroskopu. Vlákno z matrice ST 27 je na obrázku 3. Jeho povrch je nepoškozený a neliší se od nepoužitého vlákna. Naopak vlákno z matrice pseudopevné je vidět na obrázku 4 vlevo. Na jeho povrchu jsou vidět zřetelné stopy po kontaktu s ostrým kamenivem, vlákno je velmi roztřepené. Takováto směs nemusí být nutně špatná. Po doplnění křivky zrnitosti, v našem případě mikrosilikou, směs může vyhovět. Na posledním obrázku 4 je vidět matici silnou. Zde byl použit na matici pouze portlandský cement s vodním součinitelem $w = 0,55$. Na konci vlákna je vidět ztenčení, které je v souladu z grafem z obrázku 2. Po dosažení napětí ve vlákne 560 MPa dojde k přetržení.



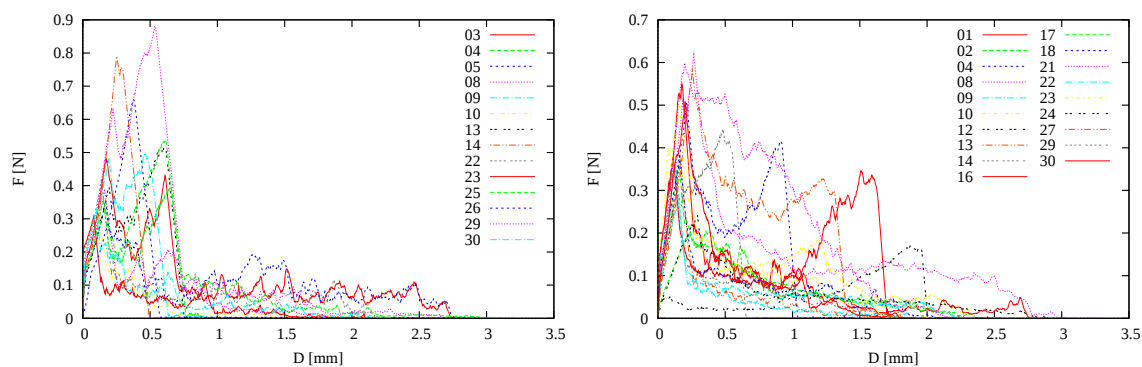
Obrázek 4: Vlevo vlákno v pseudosilné matrici, vpravo v silné matrici.

4. Zkoušky životnosti vláknocementového materiálu

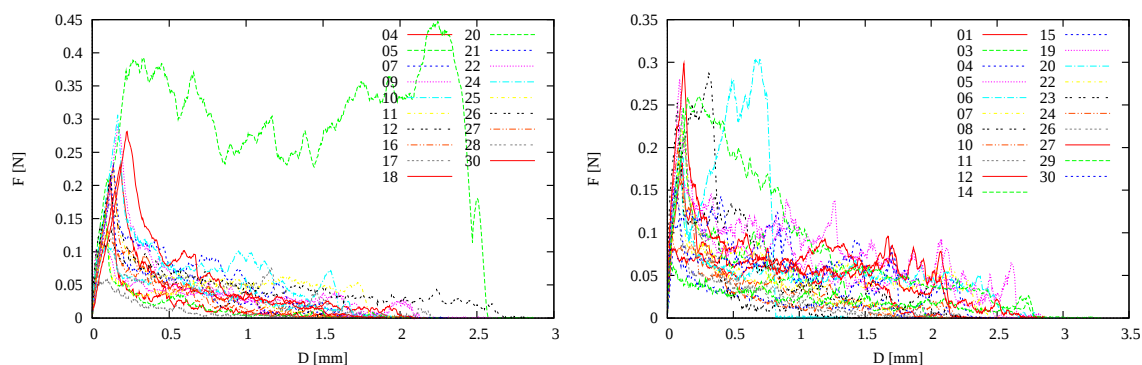
Celkem byly vyrobeny čtyři sady vzorků po 30 kusech. Vlákná byla zabetonovaná do matrice a vzorky byly uchovávané po 28 dnů ve formě na vzduchu. Po 28 dnech byly dvě sady namočené do roztoku nitrátů, kde absolvovaly jeden cyklus dlouhý 70 dnů. Toto louhování má simulovat přirozené stárnutí betonu. Po 70 dnech by stáří vzorků mělo přibližně odpovídat 60 letému betonu. Jedna sada byla cyklicky máčena do nasyceného roztoku solí $NaCl$ kde absolvovala 10 cyklů. Každý cyklus se skládal z 5 dnů máčení v nasyceném solném roztoku a dvou dnů sušení v peci při teplotě $50^{\circ}C$.

- Sada kontrolních vláken uchovávaných na vzduchu.
- Sada vláken vystavených nasycenému roztoku $NaCl$.
- Sada vláken vystavených působení roztoku $3\text{ mol } NH_4NO_3$.
- Sada vláken vystavených působení roztoku $6\text{ mol } NH_4NO_3$.

Po 125 dnech od vyrobení byly provedeny testy. Na následujících grafech je zřetelně vidět jak vzorky vystavené solím oslabily. Nejhorší výsledek jsme dostali z roztoku $3\text{ mol } NH_4NO_3$.



Obrázek 5: Vlevo vlákna bez chemického zatížení, vpravo vlákna louhovaná v solném roztoku.



Obrázek 6: Vlevo vlákna máčená v 3 mol roztoku NH_4NO_3 , vpravo vlákna máčená v 6 mol roztoku NH_4NO_3

5. Závěr

Vysoký podíl popílku jehož váhové množství se pohybuje v rozmezí 650–700 kg na metr kubický, umožňuje v tomto materiálu, ekologicky a ekonomicky zhodnotit odpadovou surovinu. Kompozitní materiály na bázi cementu tak mohou pomoci při prodlužování životnosti dopravních staveb, renovacích konstrukcí s velkými průhyby, opravách silnic a dálnic a zároveň mohou být cenným materiálem při navrhování staveb nových. Vysoká duktilita tohoto materiálu dovoluje vytvářet konstrukce tenčí, lehčí a v konečném důsledku snížit celkovou ekonomickou náročnost stavby či údržby.

6. Poděkování

Tato práce vznikla za laskavé podpory grantů GAČR 103/05/0896 a GAČR 106/05/H150. Děkuji také panu Valkovi z Bauchemia slovensko za darování vzorků superplastifikátorů a panu Ing. V. Vackovi za cenné technologické rady.

7. Literatura

- [Aïtín 2005] Aïtín, Pierre-Claude 2005: Vysokohodnotný beton, *Informační centrum ČKAIT*, Praha, 2005, ISBN 80-86769-39-9.
- [Li 2003] Li, V. C. 2003: On engineered cementitious composites (ECC) – a review of the material and its applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, Vol. 1, pp. 215-230.