

Primljen / Received: 21.1.2014.
 Ispravljen / Corrected: 10.3.2014.
 Prihvaćen / Accepted: 27.3.2014.

Dostupno online / Available online: 10.6.2014.

Svojstva vlaknima ojačanih mortova nakon izlaganja visokim temperaturama

Autori:



Doc.dr.sc. **Mohammed Ezziane**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište Hamid Ibn Badis, Alžir
 LMPC Laboratorij
ezzmed44@yahoo.fr



Doc.dr.sc. **Laurent Molez**, dipl.ing.građ.
 INSA Rennes, Francuska
 GCGM Laboratorij
Laurent.Molez@insa-rennes.fr



Prof.dr.sc. **Tahar Kadri**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište Hamid Ibn Badis, Alžir
 LMPC Laboratorij
kadriurss@yahoo.fr



Doc.dr.sc. **Raoul Jauberthi**, dipl.ing.građ.
 INSA Rennes, Francuska
 GCGM Laboratorij
Raoul.Jauberthi@insa-rennes.fr

Stručni rad

Mohammed Ezziane, Laurent Molez, Tahar Kadri, Raoul Jauberthi

Svojstva vlaknima ojačanih mortova nakon izlaganja visokim temperaturama

U radu su prikazani rezultati mehaničkog ponašanja i mikrostrukture vlaknastih i standardnih mortova nakon izlaganja visokim temperaturama. Da bi se što vjernije simulirali uvjeti požara, razvijeno je ispitivanje plamenom primjenom plina propana. Ispitivanje je provedeno na tri različita morta: na standardnom mortu, na mortu s čeličnim vlaknima te na hibridnom mortu (s jednakim omjerom čeličnih vlakana i polipropilenskih vlakana). Pri temperaturama od 400 do 700°C dodavanjem vlakana postignuta je veća duktilnost morta. Navedena opažanja poslužila su kao podloga za objašnjavanje gubitka čvrstoće.

Ključne riječi:

čelična vlakna, polipropilenska vlakna, mort, visoka temperatura, ispitivanje plamenom, savojna čvrstoća

Professional paper

Mohammed Ezziane, Laurent Molez, Tahar Kadri, Raoul Jauberthi

Properties of fibre mortars after exposure to high temperatures

Results obtained by testing mechanical behaviour and microstructure of fibre mortars and standard mortars after exposure to high temperatures are presented in the paper. A flame test using propane gas was developed to enable the best possible simulation of fire conditions. The testing was conducted on three different mortars: standard mortar, steel fibre mortar, and hybrid mortar (with equal proportion of steel fibres and polypropylene fibres). The addition of fibres ensured greater ductility of mortar at temperatures from 400 to 700°C. These observations served as a basis for explaining the loss of strength.

Key words:

steel fibres, polypropylene fibres, mortar, high temperature, flame test, flexural strength

Fachbericht

Mohammed Ezziane, Laurent Molez, Tahar Kadri, Raoul Jauberthi

Eigenschaften faserverstärkter Mörtel nach der Einwirkung hoher Temperaturen

In dieser Arbeit sind das mechanische Verhalten und die Mikrostruktur von Faser- und Standardmörteln nach der Einwirkung hoher Temperaturen dargestellt. Um mögliche Feuereinwirkungen so angemessen wie möglich zu simulieren, sind Versuche mit Propangasflammen entwickelt worden. Drei verschiedene Mörtel sind untersucht worden: Standardmörtel, Mörtel mit Stahlfasern und Hybridmörtel (mit gleichen Anteilen von Stahl- und Polypropylenfasern). Bei Temperaturen zwischen 400 und 700°C ist durch die Zugabe der Fasern eine erhöhte Duktilität erzielt worden. Aufgrund dieser Beobachtungen ist die verminderte Festigkeit erläutert worden.

Schlüsselwörter:

Stahlfasern, Polypropylenfasern, Mörtel, hohe Temperatur, Versuche zur Flammeneinwirkung, Biegefestigkeit

1. Uvod

U znanostima vezanim uz građenje, inovacije djelomično uključuju i razvoj novih materijala te pravilno korištenje njihovih svojstava. Jedan od takvih materijala je i beton ojačan vlaknima. Vlakna povećavaju mehaničku čvrstoću betona i smanjuju njegovo plastično skupljanje, dok mu istovremeno povećavaju otpornost na udar pri sobnoj temperaturi. Primjenom ovog materijala, inženjeri mogu razvijati nove konstrukcije, originalne po načinu projektiranja i po sposobnosti preuzimanja raznih vanjskih sila [1, 2].

Karakteristike takvih materijala ovise o primjeni vlakana, a ona mogu biti različita: metalna, sintetička, prirodna, staklena ili ugljična. U ovom se radu razmatra upotreba čeličnih i polipropilenskih vlakana. Poznato je da se vlakna razlikuju po sposobnosti kontroliranja pojave pukotina, po sposobnosti apsorpiranja energije i po vlačnoj čvrstoći. Treba ipak spomenuti da ponašanje cementnih materijala ojačanih vlaknima u uvjetima požara predstavlja velik izazov za istraživače.

Pri izlaganju visokim temperaturama, oštećenje cementnih materijala ojačanih cementnim vlaknima može biti malo, ali u nekim slučajevima i značajno. Zagrijavanjem se na razne načine mijenjaju svojstva materijala, a u tom smislu naročito dolazi do promjene mikrostrukture, što dovodi do pada mehaničke čvrstoće [3, 4].

Polipropilenska vlakna poboljšavaju beton tako što sprečavaju eksplozivno ljuštenje, jer do topljenja dolazi na otprilike 170°C pa tako vlaga sadržana u betonu može izlaziti kroz međusobno spojene pore [3-5].

Ovo istraživanje je provedeno da bi se ispitao doprinos čeličnih i polipropilenskih vlakana u riziku pojave mehaničke i temperaturne nestabilnosti cementnih materijala u slučaju požara.

Tablica 1. Mehanička svojstva vlakana

Karakteristike vlakana	Promjer [μm]	Dužina [mm]	Gustoća [kg/m ³]	Modul elastičnosti [GPa]	Granica topljenja [°C]	Vlačna čvrstoća [GPa]
Čelik	250	25	7850	200	1400	1,3
Polipropilen	18	12	910	6	170	0,55

Tablica 2. Sastav morta

Komponente	Mort bez vlakana (MN)	Mort s čeličnim vlaknima (MNA)	Mort s miješanim vlaknima (MNAP)
Cement CEM I 52.5 N, [kg/m ³]	504	504	504
Pijesak [kg/m ³]	1513	1513	1513
Voda [kg/m ³]	252	252	252
Čelična vlakna [kg/m ³]	0	45	22,5
Polipropilenska vlakna [kg/m ³]	0	0	2,5
Voda/cement	0,5	0,5	0,5

2. Eksperimentalni dio

2.1. Pripremanje uzorka

Za potrebe istraživanja, pripremljene su tri vrste morta: standardni mort (MN), mort s čeličnim vlaknima (MNA) i mort s hibridnim čelično-polipropilenskim vlaknima (MNAP). Ukupna količina vlakana po obujmu iznosila je 0,58 %, tj. 45 kg/m³ čeličnih vlakana ili 5 kg/m³ polipropilenskih vlakana. Ovaj često korišteni omjer omogućuje dobru obradivost [6-8]. Mehanička svojstva vlakana i sastav morta prikazani su u tablicama 1. i 2. Uzorci su stavljeni u vlažnu prostoriju (20°C, 95 % relativne vlage) iz koje su nakon 24 sata prebačeni u suhu prostoriju (20°C, 50 % relativne vlage) gdje su ostavljeni 28 dana. Pod tim uvjetima većina slobodne vode isparava iz cementne matrice [9]. Na uzorke su postavljeni termočlanci i to na raznim dubinama (1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm i 3 cm) prije ispitivanja pomoću propanskog plamena (slika 1.).

2.2. Ispitivanje plamenom

Mehanička svojstva ovise o veličini uzorka i o brzini povećanja temperature. U uzorcima, temperaturni gradijent može dovesti do pojave mikropukotina i to zbog toplinske ekspanzije. Osim toga, na kemijske i mineraloške promjene utječu i postignute temperature te trajanje izlaganja [9-13].

Ploče dimenzija 16x16x4 cm, izrađene od standardnog morta i od morta ojačanog vlaknima, postavljene su u uređaj radi provođenja ispitivanja plamenom (slika 2.).

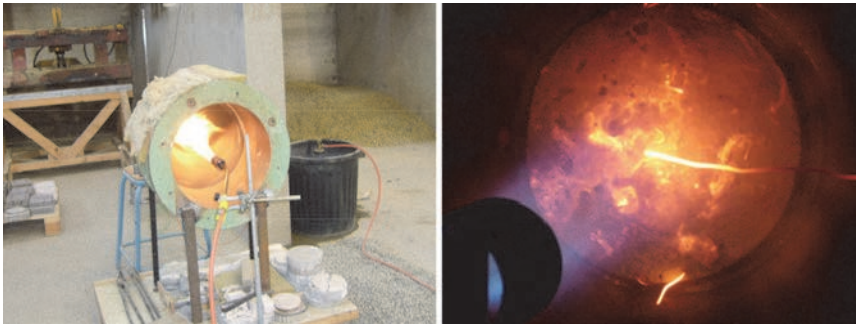
Temperatura na strani izloženoj plamenu postavljena je na 1000 °C, i ta je temperatura održavana u vremenu od jednog sata. Po završetku ispitivanja, ploče su ohlađene prirodnim putem, na zraku. Nakon toga, na uzorcima su obavljena komparativna ispitivanja probojem (slika 3.).



Slika 1. Uzorci s termočlancima: a) vanjska strana; b) položaj termočlanaka



Slika 3. Izgled uzorka nakon jednosatnog zagrijavanja propanskim plamenom



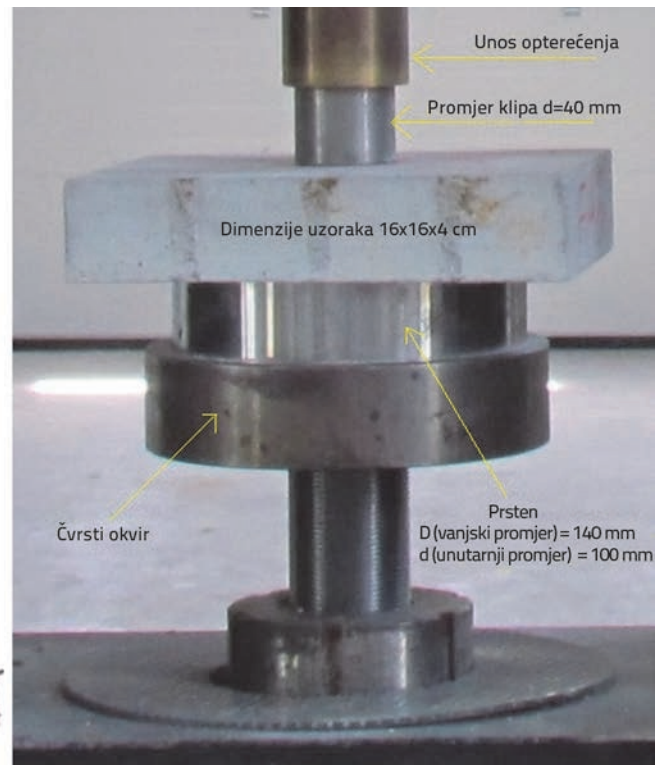
Slika 2. Oprema za zagrijavanje pomoću propanskog plamena

2.3. Ispitivanje probojem

Čvrstoća na proboj ispitana je da bi se omogućila usporedba vrijednosti preostale mehaničke čvrstoće uzoraka (ohlađenih na sobnu temperaturu prije ispitivanja) [14]. Oprema korištena za ispitivanje proboja prikazana je na slici 4.



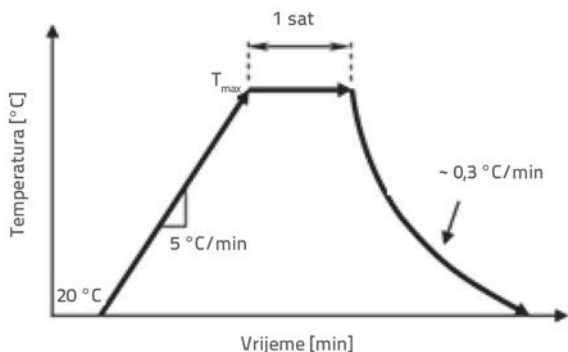
Slika 4. Ispitivanje probojem: a) oprema za ispitivanje; b) slom probojnim smicanjem



2.4. Izlaganje visokim temperaturama u peći

Uzorci dimenzija 4x4x16 cm³ uzeti iz sve tri vrste morta i pripremljeni su kako je prije navedeno. Uzorci su zagrijavani do visoke temperature u peći. Temperature zagrijavanja iznosile su 20°C, 400°C, 800°C i 1000°C. Temperatura zagrijavanja održavana je jedan sat. Smatra se da je to vrijeme dovoljno za dobivanje relativno konstantne temperature u uzorcima pri svim temperaturama [15, 16]. Temperatura je povećavana brzinom od 5 °C/min (slika 5.).

t °C/min	T _{max} [°C]		
5	400	800	1000

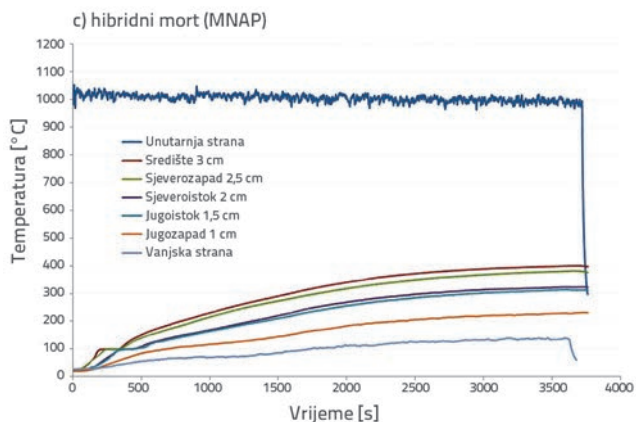
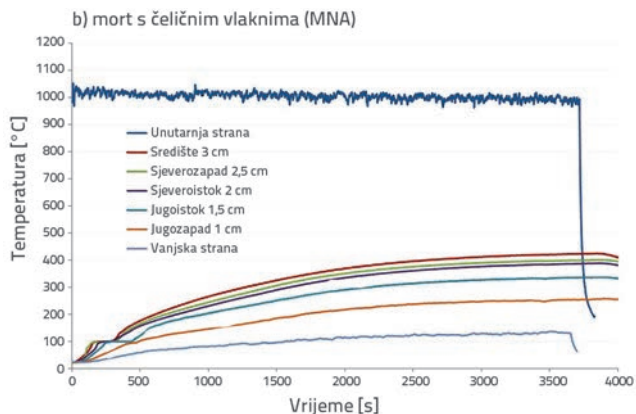
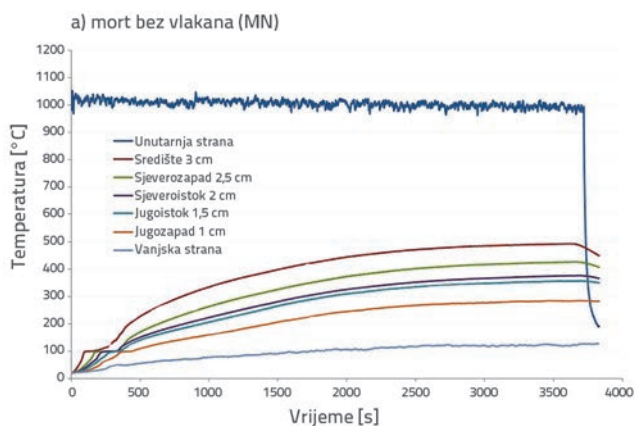


Slika 5. Postupak zagrijavanja

2.5. Rezultati provedenih istraživanja

2.5.1. Promjena temperaturnog gradijenta tijekom ispitivanja plamenom

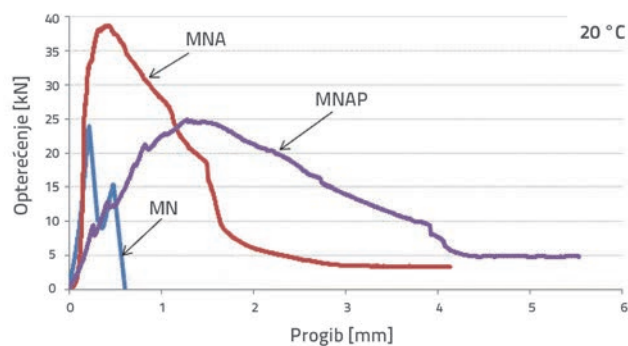
Promjena temperature u vremenu prikazana je na slici 6. za svaku točku mjerenja (termočlanak). Sa slike 6. jasno se vidi da se prijenos topline kroz cementni mort odvija sporo. Nakon sat vremena grijanja pri temperaturi od 1000 °C, temperatura je na neizloženoj strani iznosila 140 °C, dok je temperatura iznosila samo 380 °C na dubini od 2 cm. Prisutnost čeličnih vlakana nije utjecala na toplinsku provodljivost materijala.



Slika 6. Temperaturni gradijent tijekom ispitivanja plamenom

2.5.2. Posmična čvrstoća

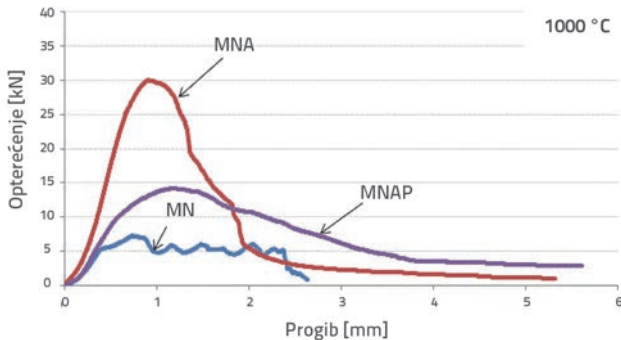
Uzorak je izložen osnom opterećenju pri čemu je jednostavno pridržan kružnim prstenom. Rezultati (opterećenje – progib) zabilježeni za negrijane uzorke i za uzorke grijane na 1000 °C prikazani su na slikama 7. i 8.



Slika 7. Dijagram opterećenje-progib za ispitivanje na proboj (negrijani uzorak)

Posmična čvrstoća nearmiranog i negrijanog morta iznosi 24 kN, ali se spušta na 5 kN nakon grijanja (gubitak od 80 %). Posmična čvrstoća morta s čeličnim vlaknima smanjuje se sa 38 na 30 kN (gubitak od 21 %). Kod miješanih čelično-polipropilenskih vlakana sila se smanjuje sa 25 na 15 kN (gubitak od 40 %) u postupku zagrijavanja. Utjecaj

čeličnih vlakana vrlo je velik na sobnoj temperaturi, ali i kod zagrijanih elemenata. Po svom ponašanju, mortovi s miješanim čelično-polipropilenskim vlaknima nalaze se negdje u sredini.



Slika 8. Dijagram opterećenje-progib za ispitivanje na proboj (grijani uzorak)

2.5.3. Savojna čvrstoća

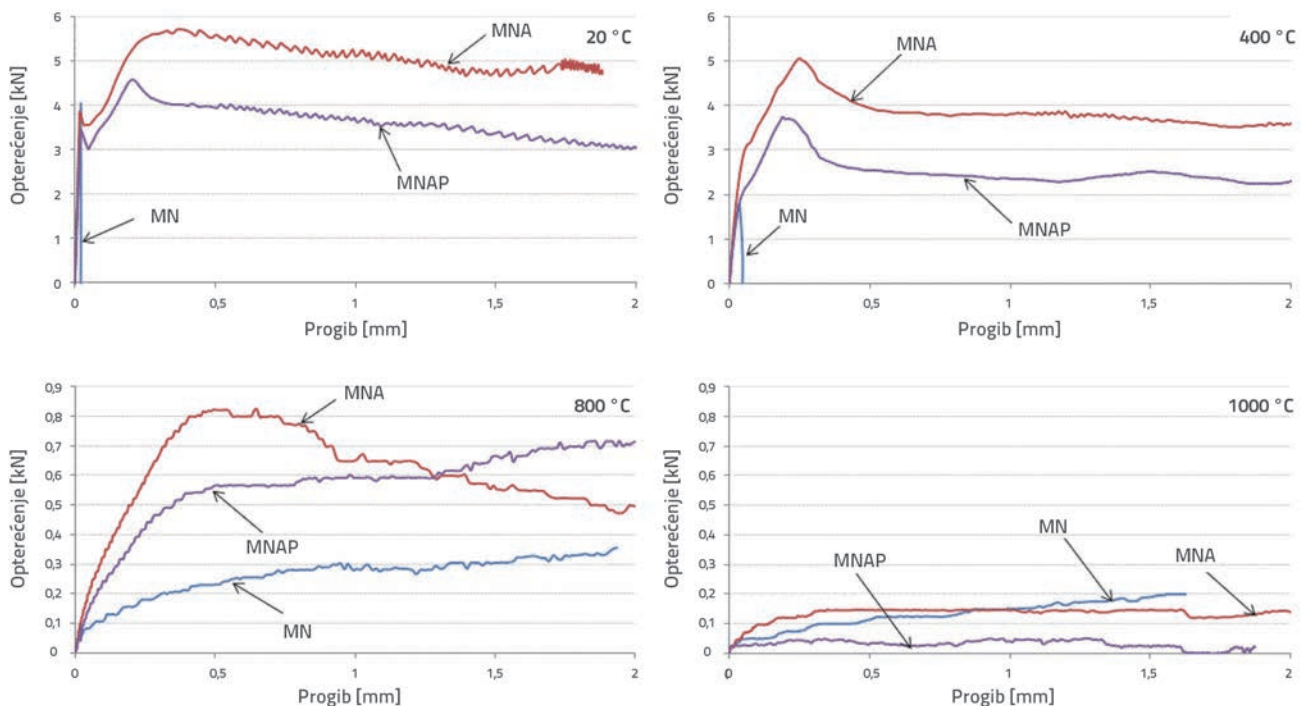
Savojna čvrstoća uzoraka dimenzija 4x4x16 cm³ prikazana je na slici 9. Rezultati ispitivanja savijanja obavljenih na nearmiranom mortu (MN) i na mortovima armiranim čeličnim vlaknima (MNA) i miješanim čelično-polipropilenskim vlaknima (MNAP) prikazani su na slici 9. Krivulje prikazane na slici 9. odabrane su da obuhvate ponašanje svih vrsta mortova i za sve uvjete ispitivanja.

Pri sobnoj temperaturi, linearnoelastično ponašanje slično je za obje vrste vlakana, tj. za isti linearni nagib. Prije pojave većih pukotina, vlakna ne doprinose ponašanju kompozita, na koji uglavnom utječu svojstva cementne matrice. Utjecaj vlakana i razlika u ponašanju prema vrsti vlakana dolaze do izražaja u području nakon vršne vrijednosti. Dodavanje vlakana dovodi do boljšeg ponašanja kompozita nakon vršne vrijednosti, te do bolje duktilnosti u usporedbi s izraženom krtošću matrice bez dodataka.

Nelinearno ponašanje uočeno je u odnosu na temperature zagrijavanja, a mehaničko ponašanje materijala mijenja se ovisno o temperaturi. Pri visokim temperaturama, mort je podložan pojavi pukotina, što dovodi do značajnih fizikalno-kemijskih promjena koje utječu na savojna svojstva morta.

Svi rezultati ispitivanja na zagrijanim uzorcima također upućuju na ulogu vlakana u duktilnom ponašanju kompozita, iako su uočene značajne razlike između pojedinih materijala s vlaknima. U tom smislu, mort pojačan čeličnim vlaknima (MNA) ponaša se mnogo bolje (više maksimalno opterećenje i više opterećenje nakon vršne vrijednosti) od referentnog morta (MN) ili hibridnog morta (MNAP) pri temperaturi od 800 °C. Po svom ponašanju, miješani mort MNAP može se smjestiti negdje u sredinu između morta pojačanog čeličnim vlaknima i morta bez pojačanja.

Utjecaj vlakana očit je bez obzira na temperaturu, barem u području do 800 °C. Utjecaj se smanjuje usporedo s povećanjem temperature.



Slika 9. Dijagrami opterećenje-progib za ispitivanje savijanja u 4 točke obavljenog na uzorcima grijanima u peći.

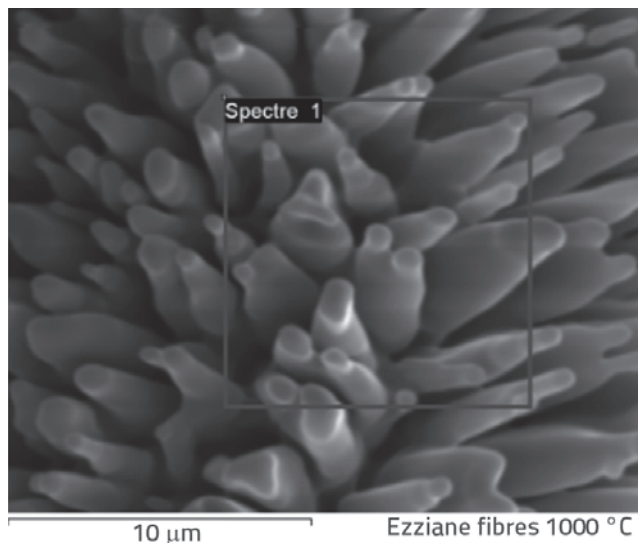
3. Analize pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa (SEM)

SEM analize prikazane su na slikama 10.a₁ i 10.a₂ za 400 °C, 10.b₁ i 10.b₂ za 500 °C te 10.c₁ i 10.c₂ za 800 °C.

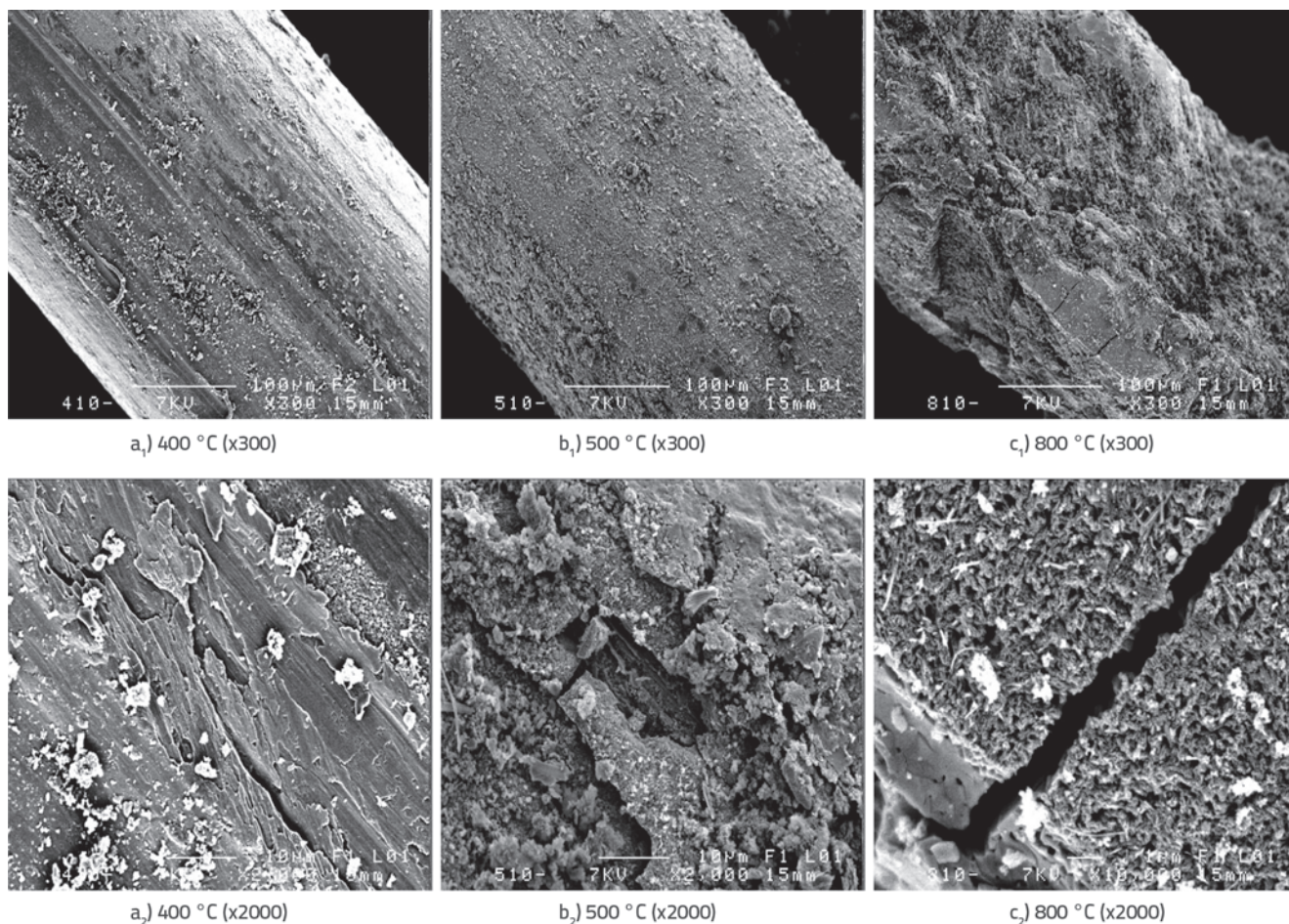
Pri temperaturi od 400 °C prvobitni izgled vlakana ostaje nepromijenjen. Talog na vlaknima koji se sastoji od Ca, O, Si i Al od cementnih hidrata, pokazuje da je prionljivost matrice još uvijek prilično dobra.

Pri temperaturi od 500 °C površina vlakana počinje se mijenjati: vlakna se mijenjaju tj. počinju oksidirati. Analiza površine vlakana pomoću mikroskopske upućuje na prisutnost željeznog oksida (FeO), koji se formira samo pri visokim temperaturama (slika 11.). Vourlias i ostali [13] uočili su slične pojave na čeliku grijanom na temperaturi od 950 °C u vremenu od 15 sati.

Pri temperaturi od 800 °C presjek vlakana se smanjuje i dolazi do pojave poprečnih pukotina (slika 10.c₂). Te pukotine i to smanjenje presjeka objašnjavaju se padom vlačne čvrstoće uzoraka. Kod vlakana je efekt premoščivanja vrlo slabo izražen.



Slika 11. Prikaz oksida formiranih na površini čeličnog vlakna kod uzorka zagrijanog na 1000 °C



Slika 10. Prikaz čeličnih vlakana izvađenih iz uzoraka morta

4. Zaključak

Standardni mortovi odlikuju se određenim zaštitnim svojstvima u slučaju požara. Međutim, oni brzo u potpunosti gube svoju savojnu čvrstoću. Da bi se takvo stanje popravilo, predlaže se ojačanje morta pomoću vlakana. Mehaničko ponašanje običnih mortova uspoređeno je s ponašanjem morta ojačanog čeličnim i polipropilenskim vlaknima. Navedeni su mortovi izloženi temperaturama od 400 °C, 500 °C, 800 °C i 1000 °C.

Dobiveni rezultati pokazuju da čelična vlakna doprinose poboljšanju vlačne čvrstoće pri visokim temperaturama te da isto tako umanjuju stupanj oštećenja morta tijekom zagrijavanja. Čelična vlakna ne utječu na fizikalna i kemijska oštećenja, ali umanjuju pojavu pukotina tijekom zagrijavanja i kontroliraju širenje tih pukotina prilikom mehaničkog opterećenja.

Polipropilenska vlakna tope se na temperaturi od 170 °C i tako dolazi do stvaranja pora, čime se ograničava porni tlak zbog isparavanja porne vode tijekom zagrijavanja i stoga se smanjuje količina pukotina.

Promjena temperature u materijalima mjerena je u raznim točkama pri zagrijavanju na 1000 °C pomoću propanskog plamena. Vlakna ne utječu na pronos topline.

Nakon jednosatnog zagrijavanja uzorci su ispitani te je određena njihova otpornost na proboj. Ispitivanje je pokazalo

da čelična vlakna izvrsno ispunjavaju svoju zadaću u smislu poboljšanja otpornosti na deformacije (najbolja duktilnost), što dovodi do postupnog sloma umjesto naglog popuštanja jer vlakna premošćuju pukotine i prenose sile do površina sloma. Značajno se povećava rasap energije prije uništenja uzorka (područje ispod krivulja opterećenje-progib), dok SEM analize i analize pomoću mikroskopa pokazuju da pri visokim temperaturama dolazi do oksidacije čeličnih vlakana. Ta oksidacija dovodi do gubitka čvrstoće i značajne duktilnosti iznad 800 °C što može negativno djelovati na eventualno dodavanje čeličnih vlakana radi zaštite od požara. Međutim, ta se temperatura odnosi jedino na područje udaljeno samo nekoliko milimetara od plamena: kada udaljenost od plamena iznosi jedan centimetar, temperatura ne prelazi 500 °C nakon jednosatnog zagrijavanja.

I konačno, kriterij gubitka čvrstoće smanjuje se uvođenjem čeličnih vlakana (0,58 % volumena). Djelotvornost je vrlo velika u pogledu mehaničkog ponašanja kada visoka temperatura ne prelazi granicu od 500 °C na udaljenosti od jednog centimetra od plamena nakon jednosatnog grijanja. Hibridni mortovi nude prikladan kompromis: polipropilenska vlakna smanjuju unutarnji tlak koji uzrokuje pojavu pukotina tijekom zagrijavanja, a čelična vlakna smanjuju pojavu pukotina tijekom zagrijavanja, ali i za vrijeme kasnijeg mehaničkog opterećenja.

LITERATURA

- [1] Pimienta, P., Chanvillard G.: Retention of the mechanical performances of Ductal® specimens kept in various aggressive environments, Conference on fib Symposium "Concrete structures: the challenge of creativity", Avignon, France, 2004.
- [2] Behloul, M., Lee, K.C. and Etienne, D.: Seonyu Ductal® Footbridge, Conference on fib Symposium "Concrete structures: the challenge of creativity", Avignon, France, 2004.
- [3] Serdar, A., Halit, Y. and Bulent, B.: High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibres, Construction and Building Materials, 22 (4), pp. 504-512, 2008.
- [4] Fu, Y.F., Wong, Y.L., Poon, C.S., Tang, C.A., Lin P.: Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures, Cement and Concrete Research, 34 (5), pp. 789-797, 2004.
- [5] Nishida, A., Yamazaki, N., Inoue, H., Schneider, U., Diederichs U.: Study on the properties of high strength concrete with short polypropylene bre for spalling resistance, Concrete under severe conditions: environment and loading, 2, pp. 1141-1150, 1995.
- [6] Beaudoin, J.J.: Béton renforcé de fibres (Conseil national de recherches Canada, Division des recherches en bâtiment), Canada, 1982.
- [7] Swamy, R.N., Mangat, P.S.: Influence of fibre geometry on the properties of steel fibre-reinforced concrete, Cement and Concrete Research, 4, pp. 307-313, 1974.
- [8] Bentur, A., Mindess, S.: Fibre Reinforced Cementitious Composition, Second edition, USA, 2007.
- [9] Andrade, C., Sarría, J., Alonso, C.: Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, Cement and Concrete Research, 29 (8), pp. 1249-1259, 1999.
- [10] Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X., Campo, J.: Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction, Cement and Concrete Research, 34 (9), pp. 1633-1644, 2004.
- [11] Georgali, B., Tsakiridis, P.E.: Microstructure of fire-damaged concrete. A case study, Cement and Concrete Composites, 27 (2), pp. 255-259, 2005.
- [12] Fares, H., Noumowé, A., Remond, S.: Self-consolidating concrete subjected to high temperature. Mechanical and physicochemical properties, Cement and Concrete Research, 39 (12), pp. 1230-1238, 2009.
- [13] Vourlias, G., Pistofidis N., Chrissafis, K.: High-temperature oxidation of precipitation hardening steel, Thermochimica Acta, 478 (2), pp. 28-33, 2008.
- [14] Menétrey, Ph.: Synthesis of punching failure in reinforced concrete, Cement and Concrete Research, 24 (6), pp. 497-507, 2002.
- [15] Barragán, B.E., Giaccio, G.M., Zerbino, R.L.: Fracture and failure of thermally damaged concrete under tensile loading, Materials and Structures, 34 (5), pp. 312-319, 2001.
- [16] Pliya, P., Beaucour, A-L., Noumowé, A.: Contribution of cocktail of polypropylene and steel bres in improving the behaviour of high strength concretes subjected to high temperature, Construction and Building Materials, 25 (4), pp. 1926-1934, 2011.