

UDK 666.94.002.2:699.81

Priljeno 15. 7. 2008.

Utjecaj tipa cementa i agregata na požarnu otpornost mikrobetona

Ivanka Netinger, Dubravka Bjegović, Ivana Kesegić

Ključne riječi

mikrobeton, visoke temperature, tip cement, zgora, drobljena opeka/drobljeni crijep, riječni agregat

Key words

microconcrete, high temperatures, cement type, slag, crushed brick/crushed tile, river aggregate

Mots clés

micro béton, températures élevées, type de ciment, scorie, brique concassée/tuile concassée, agrégat roulé

Ключевые слова

микробетон, высокие температуры, тип цемента, дробленый кирпич, дробленная черепица, речной агрегат

Schlüsselworte

Mikrobeton, hohe Temperaturen, Zementtyp, Schlacke, gebrochener Ziegel, Kieszuschlag

I. Netinger, D. Bjegović, I. Kesegić

Pregledni rad

Utjecaj tipa cementa i agregata na požarnu otpornost mikrobetona

U radu je prikazana mogućnost poboljšanja požarne otpornosti betona odabirom tipa cementa i agregata koji su manje podložni djelovanju visokih temperatura. U tu svrhu provedena su prethodna ispitivanja utjecaja visokih temperatura na dva različita tipa cementa. Uspoređena su mehanička svojstva preostala nakon požara (tlačna i vlačna čvrstoća) mikrobetona sa zgorama domaćeg područja i drobljenom opekam/crijepom kao agregatom sa istim svojstvima mikrobetona sa riječnim agregatom.

I. Netinger, D. Bjegović, I. Kesegić

Subject review

Influence of cement and aggregate type on fire resistance of microconcrete

The possibility of improving fire resistance of concrete by selecting the cement and aggregate types that are less susceptible to high temperature degradation is presented in the paper. To this purpose, a preliminary testing campaign was conducted to determine the impact of high temperature on two different cement types. After exposure to fire, the residual mechanical properties (compressive and tensile strength) of microconcrete containing slag of domestic origin and crushed brick/tile as aggregate, and microconcrete containing river aggregate, were compared.

I. Netinger, D. Bjegović, I. Kesegić

Ouvrage de synthèse

L'influence du type de ciment et d'agrégat sur la résistance au feu du micro béton

La possibilité d'améliorer la résistance au feu du béton, en choisissant les types de ciment et d'agrégat les moins susceptibles à l'action des températures élevées, est présentée dans l'ouvrage. A cet effet, les essais préliminaires ont été faits afin de déterminer l'influence des températures élevées aux deux types de ciments différents. Après l'exposition au feu, les propriétés résiduelles mécaniques (résistance à la compression/traction) du micro béton contenant la scorie d'origine domestique et les briques/tuiles concassées comme agrégat, et du micro béton contenant l'agrégat roulé, ont été comparées.

И. Нетингер, Д. Бегович, И. Кесегич

Обзорная работа

Влияние типа цемента и агрегата на пожароустойчивость микробетона

В работе показана возможность улучшения пожароустойчивости бетона на основании выбора типа цемента и агрегата, менее подвергаемых действию высоких температур. С той целью проведены предварительные испытания влияния высоких температур на два различных типа цемента. Сравнивались механические свойства, сохранившиеся после пожара (прочность на давление и растяжение) микробетона со шлаками домашней территории и дроблённым кирпичём/дроблённой черепицей как агрегатом с теми же самыми свойствами микробетона с речным агрегатом.

I. Netinger, D. Bjegović, I. Kesegić

Übersichtsarbeit

Einfluss des Typs des Zements und des Zuschlags auf die Feuerbeständigkeit des Mikrobetons

Im Artikel ist die Möglichkeit dargestellt die Feuerbeständigkeit des Betons zu verbessern durch Auswahl der Typen von Zement und Zuschlag die von der Wirkung hoher Temperaturen weniger beeinflusst werden. Mit diesem Ziel durchführte man vorhergehende Untersuchungen des Einflusses hoher Temperaturen auf zwei Zementtypen. Man verglich die überbliebenen mechanischen Eigenschaften die nach dem Brand (Druck- und Zugfestigkeit) eines Mikrobetons mit Schlacken aus dem einheimischen Gebiet und gebrochenem Ziegel als Zuschlag mit den gleichen Eigenschaften des Mikrobetons mit Kieszuschlag.

Autori: Mr. sc. **Ivanka Netinger**, Građevinski fakultet Osijek; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, Građevinski fakultet Zagreb, **Ivana Kesegić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek

1 Uvod

Rezultati studija provedenih u svijetu pokazali su da učinak požara na konstrukciju ovisi o vrsti materijala od kojeg je konstrukcija izvedena i da beton pokazuje vrlo dobro ponašanje pri povišenim temperaturama. Međutim iako se radi o materijalu dobre požarne otpornosti, ne znači da požar i povišene temperature ne utječu na svojstva betona. Promjena boje, tlačne čvrstoće, modula elastičnosti, gustoće betona te izgledu njegove površine (ljuštenje) svojstva su na koje utjecaj visoke temperature ostavlja traga. Prema najnovijim istraživanjima, primjenom «pametnih betona» mogu se postići učinkovite mjere koje reduciraju vjerojatnost pojave ljuštenja betona u armiranobetonskim elementima, štiteći ujedno i čelik (armaturni i prednapeti) u elementu od dostizanja njemu kritične temperature. U ovom radu se upućuje na mogućnost poboljšanja požarne otpornosti betona isključivo odabirom tipa cementa i agregata manje podložnih djelovanju visokih temperatura.

2 Ponašanje cementa zbog izloženosti visokim temperaturama

Zbog podložnosti brojnim fizikalno-kemijskim transformacijama poradi visokih temperatura, cementna je pasta vrlo nestabilna komponenta betona. Smatra se da unutar temperatura od 4-80 °C produkti hidratacije običnoga portlandskog cementa ostaju kemijski nepromijenjeni. Stoga se promjene svojstava cementne paste u navedenom rasponu temperatura pridružuju fizikalnim promjenama (promjene u Van der Waalsovima kohezivnim silama, promjene u poroznosti, pojava mrežastih pukotina) ili ubrzanoj hidrataciji cementa. Iznad temperature od 80 °C ponašanje cementne paste u dijelu elementa koja ima mogućnost evaporacije vode tijekom izloženosti požaru (površinski sloj betona u elementu) razlikovat će se od ponašanja cementne paste koji zadržava vlagu pod hidrotermalnim uvjetima (unutarnji sloj betona u elementu). Promjene svojstava cementne paste iz površinskog sloja betonskog elementa uglavnom će biti uvjetovane temperaturom, dok će ponašanje cementne paste u unutarnjem sloju betona ovisiti o C/S omjeru - manji C/S omjer osigurava bolje ponašanje zbog izloženosti visokim temperaturama. Sukladno literaturi, mineralnim dodacima kao što su zgura ili leteći pepeo umanjuje se C/S omjer u cementnoj pasti, čime se i osigurava njezina povećana požarna otpornost. Zamjenom dijela cementa silikatnom prašinom također je moguće poboljšati otpornost cemente paste na požarno djelovanje [1], [2]. Osim dodataka cementu, literatura navodi i mogućnost utjecanja na požarnu otpornost cementa u fazi njegove proizvodnje. Izrada portlandskoga cementa bez dodatka gipsa jedna je od takvih mjera [2].

Eksperimentalni dio ovog rada uspoređuje ponašanje dvaju komercijalno dostupnih cementata s ovog područja koji bi sukladno ovdje navedenom trebali pokazivati bolju požarnu otpornost u odnosu na čisti portlandski cement. Promatran je utjecaj visokih temperatura na mehanička svojstva mikrobetona sa CEM II /B-M (P-S) 32,5R i CAC 75.

3 Požarna otpornost agregata u betonu

Glavni doprinos termalnim svojstvima i koeficijentu istezanja betona ipak daje agregat. Osim što zauzima 60-80 % volumena betona, agregat umanjuje skupljanje i pužanje cementne paste u betonu. Kada je riječ o požarnoj otpornosti betona, tip agregata često se zanemaruje. Sukladno dosadašnjim istraživanjima, drobljena prepečena opeka i korund u samom su vrhu što se tiče stabilnosti pri izloženosti visokim temperaturama. U opadajućem nizu slijede ih ekspandirana zgura, škriljac, ekspandirane gline, granit i bazalt, vapnenački agregati, silicijski agregati te kvarc [1], [3], [4].

Uobičajeno uporabljeni agregati u betonu na našim su područjima oni iz prirodnih izvora – riječni agregati i dolomit. Kvarc (SiO_2) prisutan u silicijskim agregatima i pijesku podložan je brojnim fizikalnim promjenama pri povišenim temperaturama. Najpoznatija je od tih promjena povratna endotermička kristalna α - β transformacija kvarca koja nastaje pri 575 °C, uz pridruženu joj naglu obujamsku ekspanziju od 5,7 %. Karbonatni agregati kao što je dolomit stabilni su do 700 °C kada se kalcijev karbonat (CaCO_3) počinje razlagati na kalcijev oksid (CaO) i ugljikov dioksid (CO_2) [1].

U eksperimentalnom dijelu rada koji se odnosi na utjecaj visokih temperatura na tip agregata u betonu, slijedila je pretpostavka da materijali nastali pri visokim temperaturama koji su iskoristivi kao agregat čine beton otpornijim na visoke temperature. Naglasak je stavljen na mogućnost primjene zgure kao agregata u betonu, čime bi se osim doprinosa požarnom inženjerstvu dao doprinos i zbrinjavanju tog otpadnog materijala s područja Republike Hrvatske. Osim zgure rad upućuje i na mogućnost primjene loma opekarske industrije (drobljene opeke i drobljenog crijepa) kao agregata koji poboljšava požarnu otpornost betona.

3.1 Zgura

Zgura je otpadni proizvod nastao pri pročišćavanju metala, njegovu lijevanju i legiranju. Prema vrsti metala pri čijoj je preradi dobivena, zgure mogu biti: zgure obojene metalurgije i zgure crne metalurgije. Ovisno o načinu hlađenja i očvršćivanja rastopljene mase (one iz prerade obojenih i crnog metala) razlikujemo nekoliko osnovnih vrsta zgura: kristaliziranu zguru (dobiva se lijevanjem u korita te ostavljanjem pod uvjetima okoline na hlađenju),

granuliranu zguru (dobivenu hlađenjem s pomoću mlaza vode ili zraka do staklastog stanja, uz malu ili nikakvu kristalizaciju) i ekspaniranu zguru (dobivenu hlađenjem rastaljene mase kontroliranom količinom vode, zraka ili pjene).

S obzirom da i do 88 % [5] ukupne prerade metala otpada na preradu željeza i čelika, glavni problem pri zbrinjavanju zgura čini upravo zgura crne metalurgije (visokopećna i čeličanska zgura). U svijetu se bilježi uporaba zgura iz visokih peći kao poboljšivača tla, kao zamjena dijela cementa i kao materijal za stabilizaciju tla. Čeličanska se zgura rabi kao agregat za oblaganje pokosa rijeka, nasipavanje erodiranih korita rijeka i kao agregat u asfaltnim mješavinama. Upotreba zgure kao agregata u betonu još nije dovoljno proučena. Budući da je većina zgura hlađena na zraku te čini čvrstu stijensku masu, za potrebe agregata takva masa zahtijeva konvencionalno drobljenje i prosijavanje da bi se zadovoljili zahtjevi za granulacijom. Ovako nastao agregat ima dobre mehaničke karakteristike, zdravog je zrna, dobre otpornosti na abraziju, velike tvrdoće, izražene otpornosti na cikluse zamrzavanja/odmrzavanja [6], [7], [8] pa bi u betonu mogao poslužiti kao zamjena redovito upotrebljavanom agregatu iz prirodnih izvora.

3.1.1 Raspoloživost zgure na području Republike Hrvatske

Zgure s područja Republike Hrvatske podrijetlom su iz obojene i crne metalurgije te legiranja željeza. Zgure iz obojene metalurgije prodane su u izvoz ili su odložene ugradnjom u nasip te do sada potpuno integrirane u okolno tlo. Neriješeno je još ostalo pitanje zbrinjavanja zgura iz domaćih željezara – Željezare Sisak i Željezare Split. Zgura odložena blizu Siska rasprostranjena je na ukupno 25 ha i mješovitog je sastava – kombinacija visokopećne i elektropećne zgure. Količina odlaganog materijala na tom području procjenjuje se na 1,5 milijuna tona. Trenutačno se ova zgura rabi u cestogradnji (kao stabilizacijski sloj) i u poljoprivredi (sitnije se frakcije rabe kao poboljšivač tla). Navedenoj količini zgure sa odlagališta u Sisku treba pribrojiti i novonastalu količinu od 300.000 tona iz proizvodnje bešavnih cijevi u Željezari Sisak, koja je u krugu pogona. Zgura s odlagališta u Splitu je podrijetlom elektropećna i do sada nije pronašla područje primjene. Količini odložene zgure u krugu tvornice (30.000 tona) treba pridodati i novonastale količine iz trenutne proizvodnje. S obzirom da se planira prerada čelika 24 h u danu, pri čemu u samo jednom satu nastane oko 3 tone zgure, trenutačno odložena količina bila bi udvostručena u razdoblju od samo godinu dana [9], [10].

Budući da agregat zauzima velik udio u volumenu betona, primjenom zgure kao agregata u betonu znatno bi se

više pridonijelo zbrinjavanju tog otpadnog materijala nego pri primjeni zgure kao dodatka cementu. Dodatno, osim povećanom otpornošću betona na visoke temperature [11], [12] primjenom zgure kao agregata pridonijelo bi se i smanjenju eksploatacije agregata iz prirodnih izvora te tako pridonijelo očuvanju okoliša.

3.2 Lom iz opekarske industrije

Lom iz opekarske industrije zajednički je naziv za otpadni materijal nastao oštećenjem zidnih elemenata i glinenog crijepa nakon završne faze njihove proizvodnje. S obzirom da zgotovljene opekarske proizvode s oštećenjem izvan granica tolerancije nije moguće plasirati na tržište, oni se u krugu tvornica usitnjavaju. Svoju primjenu lom iz opekarske industrije nalazi kao materijal za nasipavanje donjih i gornjih slojeva športskih terena. Svjetska istraživanja pokazuju mogućnost iskorištavanja drobljenih opekarskih proizvoda kao agregata u betonu, čime bi se znatno pridonijelo rješavanju problema zbrinjavanja ove vrste otpada te očuvanju prirodnih izvora. Beton pripremljen s takvim agregatom svrstava se u skupinu laganih betona. Koeficijent toplinske provodljivosti takvih betona kreće se u granicama 0,5-0,75 W/mK, dok kod betona s prirodnim agregatom iznosi oko 1,75 W/mK [13].

3.1.2 Raspoloživost loma opekarske industrije na području istočne Slavonije

Opekarska industrija Slavonije i Baranje danas ima dvije tvornice glinenog crijepa čija se godišnja proizvodnja kreće oko 44 milijuna jedinica. Zbog male debljine ovaj je crijep iznimno krhak te već u samom procesu proizvodnje i transporta unutar tvornice dio ukupne proizvodnje biva slomljen. Sukladno nekim izvorima, taj je udio čak 6 %, što na spomenutu proizvodnju i prosječnu težinu od 3 kg/kom daje procijenjenu količinu od približno 8000 tona materijala koji je potrebno odložiti [14]. Navedena količina obuhvaća samo lom nastao pri proizvodnji glinenog crijepa, dok informacije o količini loma nastaloj pri proizvodnji drugih opekarskih proizvoda autorima članka nisu bile dostupne. Kako se radi o proizvodima koji su u procesu nastanka bili izloženi visokim temperaturama (otprilike 1100 °C), upotrijebljen kao agregat u betonu mogao bi pridonijeti njegovoj boljoj požarnoj otpornosti.

4 Utjecaj tipa cementa i agregata na požarnu otpornost mikrobetona

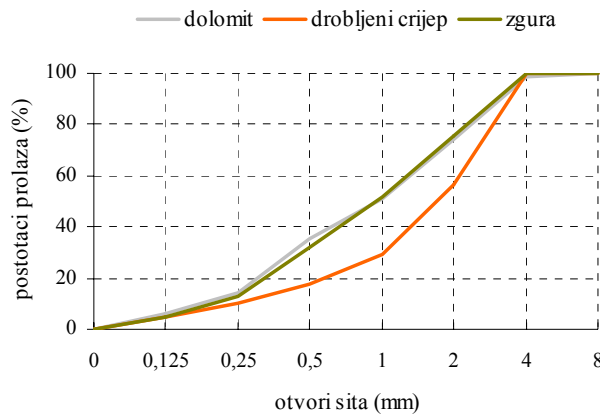
4.1 Utjecaj tipa cementa na požarnu otpornost mikrobetona

Radi utvrđivanja ponašanja na visokim temperaturama komercijalno dostupnih vrsta cementa koji bi prema

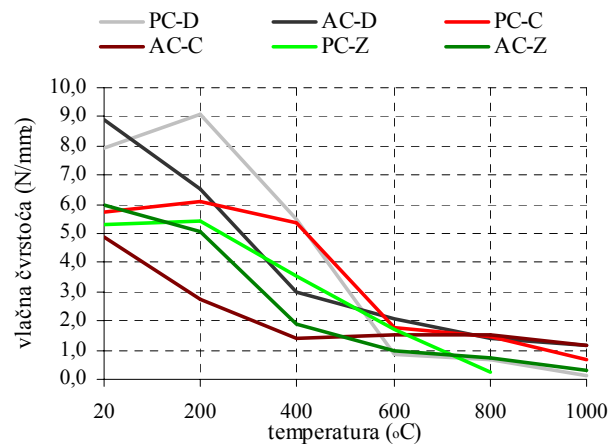
gore navedenom trebali pokazivati povećanu požarnu otpornost u odnosu na čisti portlandski cement, načinjeno je šest skupina uzoraka mikrobetona s varijacijama u tipu cementa i agregata (tablica 1.). Mješavine su pripravljene u omjeru 3:1 (agregat: cement) te uz isti vodoce-menti omjer ($v/c = 0,5$). Za pripremanje mješavina upotrijebljeni su portlandski cement s dodacima (CEM II /B-M (P-S) 32,5R) i aluminatni cement (CAC 75). Agregati u mješavini jesu: dolomit, drobljeni crijep (uzeto iz proizvodnje) i zgura podrijetlom iz Željezare Sisak (uzeto s odlagališta). Krivulja prosijavanja agregata prikazana je slikom 1.

Tablica 1. Sastojci mikrobetona

| Mješavina | Agregat | Tip cementa |
|-----------|------------------|-------------------------|
| PC-D | dolomit | CEM II /B-M (P-S) 32,5R |
| AC-D | dolomit | CAC 75 |
| PC-C | drobljeni crijep | CEM II /B-M (P-S) 32,5R |
| AC-C | drobljeni crijep | CAC 75 |
| PC-Z | zgura | CEM II /B-M (P-S) 32,5R |
| AC-Z | zgura | CAC 75 |

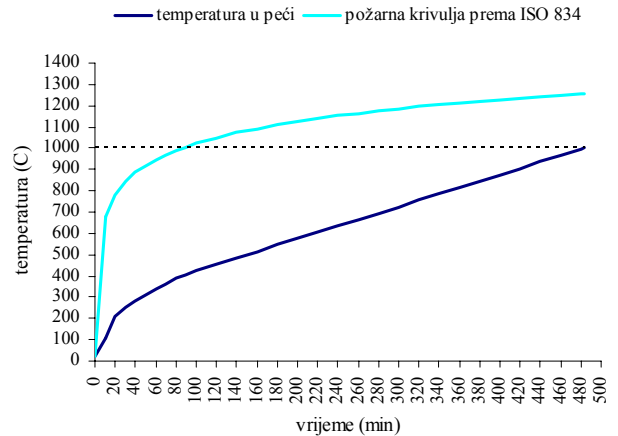


Slika 1. Krivulja prosijavanja agregata upotrijebljenih u mješavinama

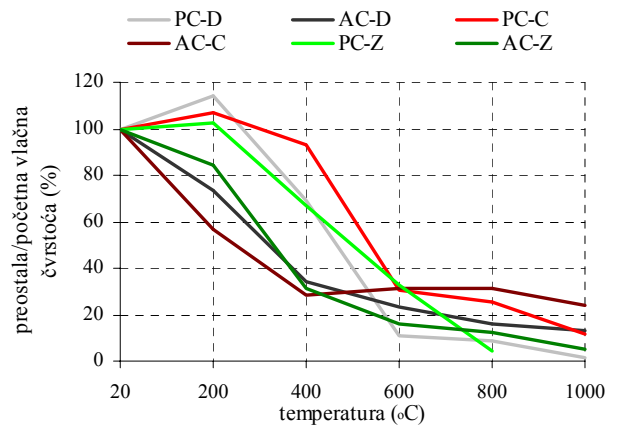


Slika 2. Usporedba temperaturne krivulje u peći i krivulje prema normi ISO 834

Uzorci izmjera 4/4/16 cm, starosti veće od 28 dana, izlagani su djelovanju visokih temperatura u ispitnoj peći. Peć je električna, izmjera 1,0/0,6/0,4 m, s prirastom temperature prema slici 2.



Slika 3. Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću uzoraka mortova sa portlandskim i aluminatnim cementom



Slika 4. Odnos preostale i početne vlačne čvrstoće mortova sa portlandskim i aluminatnim cementom nakon izloženosti visokim temperaturama

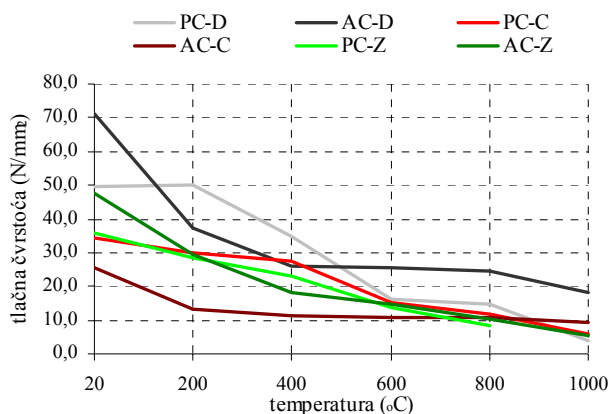
Uzorci mikrobetona stavljeni su u peć prije njezina uključivanja te nakon dostizanja zahtijevane temperature (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, i 1000 °C) zadržani 1 sat. S obzirom na veličinu peći koja nakon postignute temperature predstavlja opasnost za čovjeka pri otvaranju, uzorci su u peći ostavljeni sve do njihova potpunog hlađenja. Nakon hlađenja uzoraka ispitane su njihove vlačne i tlačne čvrstoće.

Slikama 3. do 6. prikazan je utjecaj visokih temperatura na vlačnu i tlačnu čvrstoću uzoraka. Svaka točka krivulje dobivena je na temelju triju rezultata ispitivanja pri vlačnoj čvrstoći te šest rezultata ispitivanja pri tlačnoj čvrstoći uzorka. Uvidom u slike 3. do 6. zaključuje se sljedeće:

- Uzorci s portlandskim cementom u kombinaciji sa svakim od upotrijebljenih vrsta agregata ponašaju se

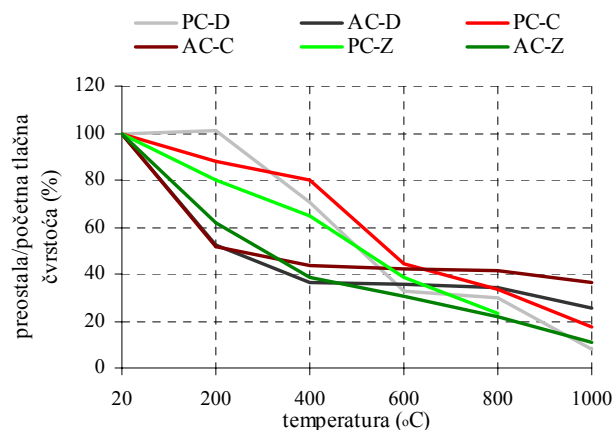
znatno bolje od uzoraka pripremljenih s aluminatnim cementom do temperature od približno 600 °C. Takvi rezultati sukladni su rezultatima istraživanja prikazanim u [15] i [16]. Opravdanost takvih rezultata tumači se činjenicom da za razliku od portlandskoga cementa kod kojega se pri temperaturama višim od 400 °C raspadaju kemijske veze, kod aluminatnog cementa na temperaturama višim od 800 °C dolazi do taljenja te se počinju stvarati keramičke veze koje omogućavaju njegovu primjenu tek na temperaturama višim od 1000 °C [16].

- Pri temperaturi od 200 °C bilježi se porast vrijednosti vlačnih čvrstoća svih uzoraka sa portlandskim cementom, što je najizraženije kod uzoraka s dolomitom (14 %). Kod iste mješavine (PC-D) bilježi se i blagi prirast tlačne čvrstoće na 200 °C (1 %), dok ostale mješavine s portlandskim cementom bilježe znatno blaži gubitak tlačne čvrstoće od mješavina s aluminatnim cementom. Prirast temperatura kod mješavina s portlandskim cementom već je zabilježena pojava i tumači se kao posljedica isušivanja betona [15], jednoličnog gubitka vlage te jačanja Van der Wallsovih sila (između čestica gela) pri gubitku vlage [17].
- Iz presjecišta krivulja koje prikazuju opadanje vlačne i tlačne čvrstoće uzoraka sa istim tipom agregata (slike 4. i 6.) vidi se da temperatura pri kojoj aluminatni cement počinje pokazivati bolju požarnu otpornost u odnosu na portlandski cement varira u rasponu od 600 °C do 800 °C. Isto upućuje na bitan utjecaj tipa agregata u mješavini na požarnu otpornost mikrobetona te je povod za ispitivanja opisana u točki 4.2.



Slika 5. Utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću uzoraka mortova s portlandskim i aluminatnim cementom

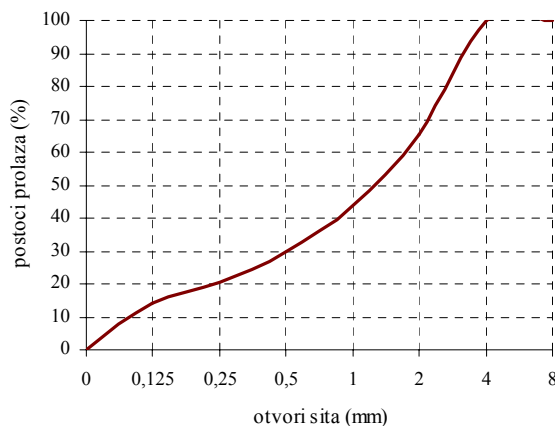
Trenutačna istraživanja u području cemenata poboljšane požarne otpornosti upućuju na geopolimerne cimente. Definirani kao grupa alkalno aktiviranih materijala, takvi cementi, nasuprot uobičajeno upotrebljavanom portlandskom cementu, pri visokim temperaturama pokazuju prirast mehaničkih svojstava [18].



Slika 6. Odnos preostale i početne tlačne čvrstoće mortova s portlandskim i aluminatnim cementom nakon izloženosti visokim temperaturama

4.2 Utjecaj tipa agregata na požarnu otpornost mikrobetona

Radi utvrđivanja ponašanja na visokim temperaturama gore nabrojanih potencijalno požarno otpornih agregata, načinjeno je pet skupina uzoraka mikrobetona. Mješavine su istog sadržaja cementa (450 kg/m^3), pripremljene uz isti vodocementni omjer ($v/c = 0,5$) te svojstava u svježem stanju prema tablici 2. Za pripremu mješavina uporabljen je cement CEM I 52,5N. Krivulja prosijavanja ista je za sve agregate (slika 2.), prilagođena za ostale agregate prema krivulji prosijavanja riječnog agregata. Kao referentna mješavina (R) promatrana je ona s riječnim agregatom, uobičajeno upotrijebljenim pri pripremanju mikrobetona. U mješavinama ZSI i ZST agregati su zgure raspoložive na području Republike Hrvatske, dok je u mješavini O agregat drobljena opeka te u C drobljeni crijep. U mješavini D agregat je drobljeni dolomit. Agregati podrijetlom iz opekarske industrije (opeka, crijep) uzeti su kao otpad izravno iz proizvodnje. Zgura iz Siska uzeta je s odlagališta, nakon višegodišnjeg izlaganja djelovanju atmosferilija, dok je zgura iz Splita uzeta izravno iz proizvodnje.



Slika 7. Krivulja prosijavanja agregata

Tablica 2. Svojstva mikrobetona u svježem stanju

| Mješavina | Agregat | Gustoća (kg/m ³) | Sadržaj pora (%) | Konzistencija (cm) | Opažanja |
|-----------|------------------|------------------------------|------------------|--------------------|-------------|
| R | riječni | 2228 | 3 | 16,0 | - |
| ZSI | zgura Sisak | 2276 | 6 | 15,6 | - |
| ZST | zgura Split | 2820 | 5 | 15,5 | trošna zrna |
| O | drobljena opeka | 1862 | 10,5 | 15,8 | - |
| C | drobljeni crijep | 1944 | 4,4 | 15 | - |
| D | dolomit | 2358 | 3 | 16 | - |

Uzorci izmjera 4/4/16 cm, starosti veće od 28 dana i vlažnosti u granicama 3-5 %, izlagani su djelovanju visokih temperatura u ispitnoj peći. S obzirom da u Hrvatskoj ne postoji peć čiji prirast temperature odgovara prirastu temperature po krivulji normiranog razvoja požara danoj u normi ISO 834, odabran je režim u peći koji isključuje utjecaj sporijeg ili bržeg prirasta temperatura (u odnosu na normirani prirast) na mehaničke karakteristike uzoraka. Uzorci su stavljani u ispitnu peć (inače žarnu), prethodno zagrijanu na neku od predviđenih temperatura (200, 400, 600, 800 i 1000 °C).

Nakon 1,5 h u peći na određenoj temperaturi, uzorci su izvađeni i ostavljeni da se hlade na sobnoj temperaturi. Nakon hlađenja uzoraka ispitane su njihove vlačne i tlačne čvrstoće.

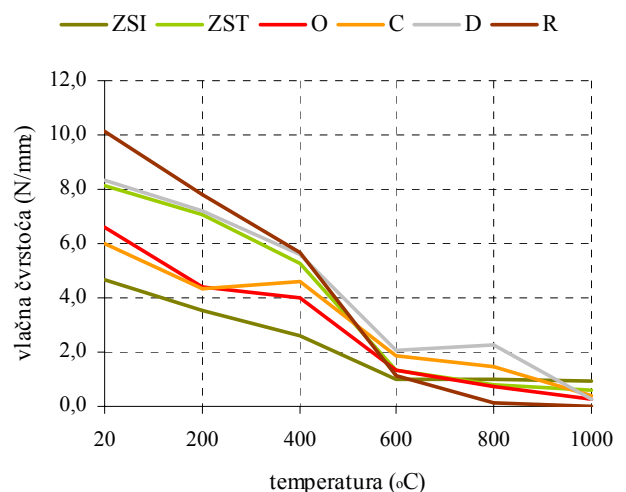
Slikama 8. do 11. prikazan je utjecaj visokim temperatura na vlačnu i tlačnu čvrstoću uzoraka. Svaka točka krivulje dobivena je na temelju triju rezultata ispitivanja kod vlačne čvrstoće te šest rezultata ispitivanja kod tlačne čvrstoće uzorka. Uvidom u slike 8. do 11. zaključuje se sljedeće:

- Zgura podrijetlom iz Siska daje mikrobeton znatno lošijih mehaničkih karakteristika pri sobnoj temperaturi od agregata za pripremanje mješavina, što se i očekivalo s obzirom na lošiju kvalitetu zrna. Vlačna i tlačna čvrstoća uzoraka sa zgurom iz Splita tek su nešto niže od istih svojstava dobivenih na uzorcima s riječnim agregatom. Mehanička svojstva mješavina s drobljenom opekam i drobljenim crijepom pri sobnoj temperaturi niža su od mehaničkih svojstava referentne mješavine, što se i očekivalo s obzirom na manju tvrdoću zrna u odnosu na riječni agregat.
- Pojava očvršćivanja mikrobetona u području do 200 °C, opisana u točki 4.1, u ovom je slučaju izostala. Razlog tome je vjerojatno znatno brži prirast temperature u uzorcima ispitanim u sklopu točke 4.2., tj. temperaturnom šoku uzoraka.

- Do temperature od 200 °C mješavine s opekam i crijepom pokazuju veći pad vlačne čvrstoće od ostalih mješavina (slika 9.), ali blaži pad tlačne čvrstoće od referentne mješavine (slika 11.). Nakon te temperature mješavina s opekam pokazuje blaže opadanje mehaničkih svojstava s porastom temperature od referentne mješavine, dok mješavina s crijepom pokazuje čak prirast u vlačnoj čvrstoći na 400 °C. Ostale mješavine pokazuju kontinuirani pad mehaničkih svojstava. Prema [19], pri izlaganju betona visokim temperaturama razlikuju se tri faze ponašanja ma-

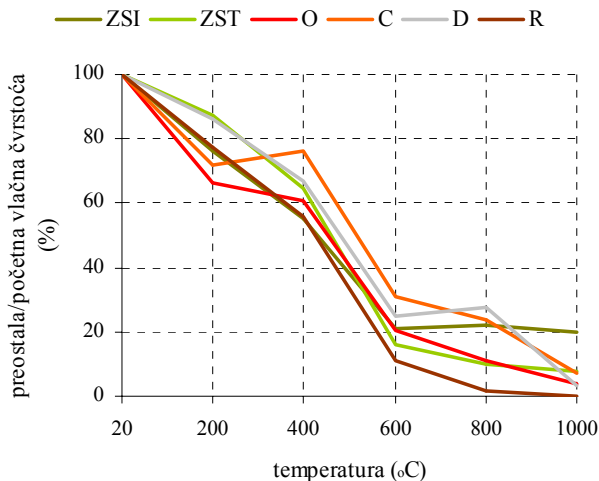
terijala s obzirom na čvrstoće: početni gubitak čvrstoće, faza stabilizacije i očvršćivanja te trajni gubitak čvrstoće. Temperaturno područje u kojem pojedina faza nastaje ovisi o vrsti betona. Tako npr. faza stabilizacije i očvršćivanja kod betona obične težine nastaje u području 400 do 450 °C, dok kod laganog betona nastaje u području od 250 do 450 °C. Kako su u ovom ispitivanju mikrobetoni pripremljeni s opekam i crijepom u kategoriji laganog betona, a ostali mikrobetoni u kategoriji betona obične težine, upravo manji raspon temperatura kod „običnih betona“ pri kojima se uobičajeno bilježi prirast čvrstoće mogao je biti uzrokom da pojava očvršćivanja ne bude zabilježena i kod mješavina obične težine.

- Nakon temperature od 400 °C, mješavina s riječnim agregatom pokazuje izraženiji pad mehaničkih svojstava od svih ostalih mješavina promatranih u okviru ovog ispitivanja. Otpadni materijali (drobljena opeka, drobljeni crijep, zgure) pokazuju tako bolju požarnu otpornost pri izloženosti temperaturama višim od 400 °C od riječnog agregata.

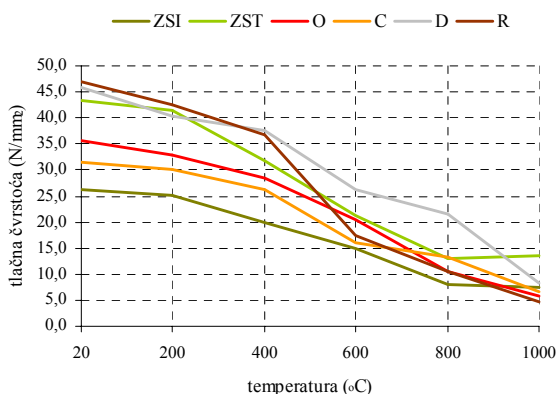


Slika 8. Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću uzoraka s različitim agregatima

- S obzirom na isti cement u svim mješavinama, dobiveni rezultati pokazuju isključivo utjecaj agregata na ponašanje mikrobetona izloženih visokim temperaturama. Prema ovdje iznesenim rezultatima ispitivanja, postoje naznake kako bi se ovi otpadni materijali mogli rabiti kao agregat u betonu, čime bi se poboljšala požarna otpornost betona prema betonu s uobičajeno uporabljanim agregatom iz prirodnih izvora.



Slika 9. Odnos preostale i početne vlačne čvrstoće uzoraka s različitim agregatima nakon izloženosti visokim temperaturama

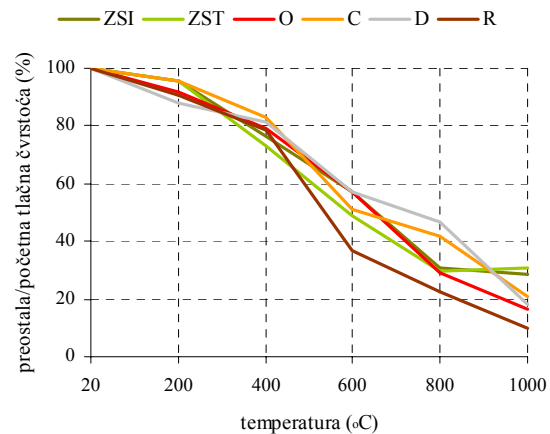


Slika 10. Utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću uzoraka s različitim agregatima

Ovakvi rezultati preliminarnih ispitivanja provedenih na mikrobetonu bit će poticaj za nastavak istraživanja ponašanja betona i s krupnijim agregatom (zrna do 16 mm) pri njegovoj izloženosti požarnom opterećenju.

LITERATURA

- [1] *Fire design of concrete structures-materials, structures and modeling*, State of the art report prepared by Working Party 4.3-1 of fib group, Stuttgart, 2007.
- [2] Škvara, F.; Ševčík, V.: *Influence of high temperature on gypsum-free Portland cement materials*, Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 5, May 1999, 713-717.



Slika 11. Odnos preostale i početne tlačne čvrstoće uzoraka s različitim agregatima nakon izloženosti visokim temperaturama

5 Zaključak

U radu se pokazuje mogućnost poboljšanja požarne otpornosti betona isključivo odabirom tipa cementa i agregata manje podložnih djelovanju visokih temperatura. Provedena su preliminarna ispitivanja utjecaja visokih temperatura na mikrobeton sa dva različita tipa cementa – CEM II /B-M (P-S) 32,5R i CAC 75 te mikrobeton s varijacijama u tipu agregata. Uvidom u rezultate ispitivanja došlo se do sljedećih zaključaka:

- Ispitivanja na razini cementa pokazala su bolju požarnu otpornost portlandskoga cementa s dodacima u odnosu na aluminatni cement te znatno različito ponašanje ovih cementa pri porastu temperature. Činjenica da aluminatni cement pokazuje bolju požarnu otpornost tek izvan temperaturnog raspona tipičnog za požar u građevinama čini ga neprikladnim za uporabu u betonu radi poboljšanja požarne otpornosti.
- Ispitivanja provedena na mikrobetonu sa zgurom domaće podrijetla i lomom opearske industrije pokazuju opravdanost uporabe ovog materijala u svrhu poboljšanja požarne otpornosti mikrobetona. Dobiveni rezultati govore u prilog teoriji da bi agregati nastali na visokim temperaturama potencijalno mogli biti korišteni kao način ostvarivanja bolje požarne otpornosti betona, što će u idućem razdoblju biti detaljnije istraženo.

- [5] Common uses for slag, www.nationalslag.org/appmatrix.htm
- [6] *Nonferrous slag - Material Description*, <http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/nfs1.htm>
- [7] *Blast furnace slag - Material Description*, <http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/bfs1.htm>
- [8] Steel slag, <http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm>
- [9] Netinger, I.; Bjegović, D.; Kesegić, I.: *Concrete of improved fire resistance, 3rd International Symposium "Non-Traditional Cement & Concrete"*, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2008., 498-507
- [10] Netinger, I.; Bjegović, D.; Jelčić, M.: *Fire resistance of structural concrete*, The 3rd Central Congress on Concrete Engineering "Innovative materials and technologies for concrete structures", Publishing Company of Budapest University of Technology and Economics, Visegrad, Hungary, 2007., 321-326.
- [11] *Fire resistance and heat transmission properties of concrete and masonry made with blast furnace slag aggregate*, National Slag Association, http://www.nationalslag.org/archive/legacy/nsa_172-1_fire_properties_of_slag.pdf
- [12] Shoaib, M. M.; Ahmed, S. A.; Balaha, M. M.: *Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars*, Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 11, November 2001, 1533-1538
- [13] Janković, K.: *Drobljena opeka kao agregat za beton*, Zadužbina Andrejević, Beograd, Jugoslavija, 2001.
- [14] Kesegić, I.; Netinger, I.; Bjegović, D.: *Crushed clay brick and tiles as an aggregate in mortar and concrete*, Structural Engineering Conferences "Networks for sustainable environment and high quality of life", SECON, Zagreb, 2008., 365-372
- [15] Škvára, F.; Ševčík, V.: *Influence of high temperature on gypsum-free Portland cement materials*, Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 5, May 1999, 713-717
- [16] Malhotra, V. M.: *Is high-alumina cement a satisfactory structural material?*, Discussion, <http://article.pubs.nrc.gc.ca/ppv/RPViewDoc?issn=12086029&volume=3&issue=3&startPage=474>
- [17] Behnood A.; Ziari, H.: *Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures*, Cement and Concrete Composites, Volume 30, Issue 2, February 2008, 106-112
- [18] Palomo, A.; Fernandez-Jimenez, A.; Pastor, J. Y.; Martín, A.; Llorca, J.: *Alkali activated fly ash: Mechanical behaviour at high temperatures*, 3rd International Symposium "Non-Traditional Cement & Concrete", Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2008., 525-535
- [19] Phan, L. T.: *Fire performance of high-strength concrete: A report of the state of the art*, Gaithersburg, Maryland, US, 1996.