



**DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE
MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE**



INSTITUT IMS AD, BEOGRAD



**UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE

**Konferencija
SAVREMENI MATERIJALI I
KONSTRUKCIJE SA REGULATIVOM**

Zbornik radova

Beograd, 17. jun 2016. godine

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

691:66.017(082)
620.1:691(082)

КОНФЕРЕНЦИЈА Савремени материјали и конструкције са
регулативом (2016 ;
Београд)

Zbornik radova / Konferencija Savremeni materijali i
konstrukcije sa
regulativom, Beograd 17. jun 2016. ; [organizatori] Društvo
za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija
Srbije ... [et al.] ; [editor Dragica Jevtić]. - Beograd :
Društvo za ispitivanje i istraživanje i konstrukcija
Srbije, 2016 (Đurinci : Atom štampa). - [10], 130 str. :
ilustr. ; 25 cm

Radovi na srp. i engl. jeziku. - Str. [9-10]: Predgovor /
Dragica Jevtić. - Tiraž 150. - Bibliografija uz svaki rad.
- Rezimeji ; Summaries.

ISBN 978-86-87615-07-6

a) Грађевински материјали - Зборници
COBISS.SR-ID 224025356

Izdavač: **Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije**
Beograd, Kneza Miloša 9/I

Editor: **Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.**
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd

Štampa: "Atom štampa" - Karađorđeva 81, 11450 Sopot

Tiraž: 150 primeraka

Konferenciju **SAVREMENI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE SA
REGULATIVOM**, koja se održava u Beogradu 17. juna 2016. godine, organizovali su
Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije i **Institut IMS**.

Skup je organizovan uz podršku: **MINISTARSTVA PROSVETE, NAUKE I
TEHNOLOŠKOG RAZVOJA** i **INŽENJERSKE KOMORE SRBIJE**

Beograd, 17. jun 2016. godine

NAUČNI KOMITET

1. Prof. dr Radomir Folić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
2. Prof. dr Dragoslav Stojić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
3. Prof. dr Mirjana Malešev, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
4. Vanr. prof. dr Gordana Topličić-Ćurčić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
5. Dr Zagorka Radojević, Institut IMS, Beograd
6. Dr Nenad Šušić, Institut IMS, Beograd
7. Dr Ksenija Janković, Institut IMS, Beograd
8. Dr Milorad Smiljanić, Institut za puteve, Beograd
9. Professor Mihailo Trifunac, Civil Eng. Department University of Southern California, Los Angeles, USA
10. Prof.dr Dubravka Bjegović, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakulte, Zagreb, Hrvatska
11. Predrag Popović, Wiss, Janney, Elstner Associates, Northbrook, Illinois, USA
12. Professor Asterios Lionis, Democratus University of Trace, Faculty of Civil Eng., Greece
13. Professor Ivan Damnjanović, Texas A&M University, College Station, TX Zachry Department of Civil Engineering, USA
14. Prof. dr Meri Cvetkovska, Građevinski fakultet, Univ. „Sv. Kiril i Metodij“, Skoplje, Makedonija
15. Prof. dr Miloš Knežević, Građevinski fakultet, Podgorica, Crna Gora
16. Prof. dr Damir Zenunović, Univerzitet u Tuzli, BIH

ORGANIZACIONI ODBOR

1. Prof. dr Dragica Jevtić, Građevinski fakultet, Beograd
2. Dr Vencislav Grabulov, Institut IMS, Beograd
3. Prof. dr Branko Božić, Građevinski fakultet, Beograd
4. Prof. dr Mihailo Muravljev, Građevinski fakultet, Beograd
5. Prof. dr Boško Stevanović, Građevinski fakultet, Beograd
6. Prof. dr Zoran Grdić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
7. Prof. dr Dragoslav Šumarac, Građevinski fakultet, Beograd
8. Prof. dr Vlastimir Radonjanin, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
9. Prof. dr Karolj Kasaš, Građevinski fakultet, Subotica
10. Prof. dr Milan Dimkić, Institut "Jaroslav Černi", Beograd
11. Milutin Ignjatović, generalni direktor Saobraćajnog Instituta CIP, Beograd
12. Pal Kermeci, inž.tehn. "Potisje Kanjiža", Kanjiža
13. Vesna Zvekić, dipl.inž.tehn., „Polet“ Novi Bečej



Aleksandar Savić¹
Marina Aškračić²
Aleksandar Radević³

UDK: 620.193.94:666.971

ISPITIVANJE UTICAJA VISOKIH TEMPERATURA NA FIZIČKO- MEHANIČKA SVOJSTVA TRADICIONALNIH MALTERA

Rezime: Tokom istorije, zidane konstrukcije su često bile izložene požarnim opterećenjima, pri čemu su pokazivale visok nivo vatrootpornosti. Zbog toga je u radu pažnja posvećena ponašanju tradicionalnih maltera, kao važne komponente zidanih konstrukcija, na visokim temperaturama. Na ovo ponašanje utiču različiti faktori: sastav, vodovezivni faktor, stepen vlažnosti, brzina zagrevanja i hlađenja, položaj u konstrukciji i sl.

U radu je ispitivan uticaj visokih temperatura (do 600°C) na vrednost čvrstoća pri savijanju i pritisku, kao i na promenu brzine ultrazvuka kroz standardne uzorke maltera. Izvršeno je poređenje dobijenih rezultata na krečnom, produžnom (krečno-cementnom) i cementnom malteru spravljanim sa drobljenim krečnjačkim agregatom i drobljenom opekom, kao delimičnom zamenom agregata.

Ključne reči: kreč, cement, reciklirana opeka, mehanička svojstva, ultrazvuk, temperatura.

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURES ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TRADITIONAL MORTARS

Abstract: Masonry structures were often exposed to fire in the past, and have shown high level of fire resistance. This is why a special attention in this paper is drawn to the behavior of historical mortars, that are important part of masonry structures, when exposed to high temperatures. This behavior is influenced by: mortar composition, water/binder ratio, humidity, warming and cooling speed, placing in the construction, etc.

Experimental results concerning influence of high temperatures (600°C) on flexural and compressive strength and ultrasonic pulse velocity on standard mortar samples are presented in this paper. Comparison of the obtained results on lime, lime-cement and cement mortars made with crushed limestone aggregate and crushed brick as a partial aggregate replacement, was made.

Key words: lime, cement, crushed brick, mechanical properties, ultrasonic pulse velocity, temperature.

¹ Doc. dr, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, sasha@imk.grf.bg.ac.rs

² Asistent – student doktorskih studija, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, amarina@imk.grf.bg.ac.rs

³ Asistent – student doktorskih studija, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, aradevic@imk.grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Ekstremna opterećenja kao što su požari, predstavljaju jednu od najvećih opasnosti za istorijske zgrade i spomenike kulture. Zidani delovi ovih konstrukcija pokazuju visok nivo otpornosti na dejstvo požara [9]. Najčešće je potrebno detaljnije istraživanje njihovog ponašanja pri dejstvu visokih temperatura, da bi se bolje razumelo stanje u kome se konstrukcija nalazi u ovim uslovima.

U tom smislu, najveći broj ispitivanja dejstva požara u svetu sproveden je na čitavim segmentima zidanih konstrukcija, dok je manji broj istraživanja posvećen ponašanju njihovih komponentnih delova kao što su elementi za zidanje i malteri [9]. Takođe, ni standardi koje se bave proračunom zidanih konstrukcija pri požarnim opterećenjima ne zahtevaju posebne uslove za maltere za zidanje [3],[4],[12].

Na fizičko-mehanička svojstva maltera, nakon dejstva povišenih i visokih temperatura, utiču, pored nivoa temperature, i karakteristike komponentnih materijala, sastav i struktura maltera, vodovezivni faktor, vlažnost uzorka, način hlađenja i sl. [8],[9].

Studije pokazuju da se promene karakteristika maltera na visokim temperaturama mogu opisati kroz tri temperaturna opsega. Prvi čine temperature do 300°C, pri kojima su vrednosti mehaničkih karakteristika maltera više ili jednake odgovarajućim vrednostima na sobnoj temperaturi. U sledećoj zoni, između 300°C i 600°C dolazi do umerenog pada čvrstoća, dok se na temperaturama preko 600°C mehaničke karakteristike naglo pogoršavaju [9]. Različite vrste agregata ponašaju se različito pod dejstvom visokih temperatura, npr. u agregatu krečnjačkog porekla dolazi do razlaganja komponenata tek na temperaturama višim od 600°C, dok kvarcni pesak povećava zapreminu za 5,7% na temperaturama oko 570°C [1].

Sastav maltera može biti raznovrstan. Ipak, mogu se izdvojiti vrste maltera karakteristične za različite periode u istoriji. P. Maravelaki-Kalaitzaki i saradnici [6] sprovedli su fizičko-hemijsku analizu na dvadeset osam uzoraka tradicionalnih maltera, pronađenih na Kritu na nekoliko nalazišta. Uzorci su obuhvatali maltere iz različitih perioda (rimskog, helenističkog, vizantijskog, venecijanskog i turskog), koji su većinom značajni i za naše područje. Oni se mogu podeliti u četiri velike grupe: krečni malteri, malteri sa hidratisanim krečom, malteri sa hidratisanim krečom i drobljenom opekom i pucolanski malteri. Autori su fizičko-hemijskom analizom uspeali da približno odrede granulometrijske sastave upotrebljenih agregata, kao i masene odnose čvrstih komponenata za ispitivane grupe maltera. Nakon pronalaska cementa u 19. veku razvijale su se i nove vrste maltera kao što su produžni (krečno – cementni), a zatim i cementni malteri.

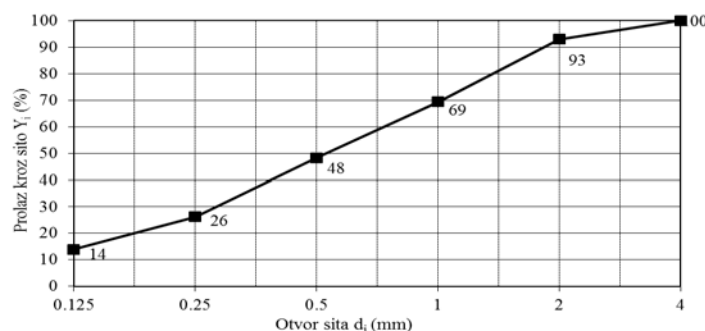
Prilikom istraživanja prikazanih u ovom radu korišćene su tri recepture tradicionalnih maltera. Dobijene vrednosti upoređene su sa rezultatima dobijenim na dvema savremenim recepturama (jednog produžnog i jednog cementnog maltera).

2. MATERIJALI I METODE

Za potrebe istraživanja spravljeno je pet vrsta maltera: krečni malter oznake K, krečni malter sa dodatkom opeke oznake KO, dva produžna (krečno-cementna) maltera oznake P1 i P2 i jedan cementni malter oznake C. Sva ispitivanja obavljena su u Laboratoriji za materijale Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

2.1. Materijali

Drobljeni sitan agregat, krečnjačkog porekla, sa lokaliteta "Sitnica" pored Herceg Novog (0/4 mm) korišćen je za spravljanje svih malterskih mešavina. Zapreminska masa ovog agregata u rastresitom stanju iznosila je $1,594 \text{ g/cm}^3$, u zbijenom stanju $1,772 \text{ g/cm}^3$, dok mu je specifična masa iznosila $2,715 \text{ g/cm}^3$. Izmereno je upijanje vode agregata od 0,15%. Granulometrijski sastav agregata odgovarao je tradicionalnim malterima na osnovu rada P.M.K. i saradnika [6] i prikazan je na slici 1. U krečnom malteru sa dodatkom opeke, deo prirodnog drobljenog agregata (frakcije 1/2 mm i 2/4 mm) je zamenjen agregatom od reciklirane opeke iste granulacije. Reciklirana opeka dobijena je drobljenjem običnih opeka i prosejavanjem dobijenog materijala. Zapreminska masa agregata od opeke iznosila je $0,882 \text{ g/cm}^3$, dok je upijanje vode materijala opeke, od koga je drobljenjem dobijen agregat, imalo vrednost od 16,2%.



Slika 1. Granulometrijski sastav krečnjačkog agregata

Kao vezivni materijali u spravljenim malterima korišćeni su hidratizirani kreč i cement. Hidratizirani kreč oznake CL 90-S proizvođača Ingram d.d., Srebrenik, Bosna i Hercegovina imao je specifičnu masu $2,319 \text{ g/cm}^3$, dok je njegova zapreminska masa bila jednaka $0,593 \text{ g/cm}^3$. Cement PC 35 M (S-L) 42,5 R, proizvođača Lafarge, Beočin korišćen je pri spravljanju produžnih i cementnog maltera. Specifična masa ovog cementa iznosila je $3,050 \text{ g/cm}^3$. Voda iz gradskog vodovoda korišćena je pri spravljanju svih pomenutih mešavina.

2.2. Mešavine

Dve recepture iz rada P.M.K. i saradnika [6] iskorišćene su za spravljanje krečnog maltera oznake K i krečnog maltera sa dodatkom opeke oznake KO. Kao vezivo u ovim malterima korišćen je hidratizirani kreč. Maseni odnosi hidratisanog kreča i agregata iznosili su 1:3 za obe vrste maltera.

Sastav produžnog maltera oznake P1 i cementnog maltera oznake C usvojen je prema savremenim preporukama iz literature [5],[7]. Maseni odnosi između cementa, hidratisanog kreča i agregata za produžni malter P1 iznosili su 1:2:6, dok je odnos između mase cementa i agregata za cementni malter bio 1:3.

Receptura za produžni malter – P2 usvojena je na osnovu preporuka datih za maltere korišćene u 19. veku u Engleskoj [2]. Radi uniformnosti i uporedljivosti rezultata kod svih maltera je usvojen isti granulometrijski sastav kao na slici 1. Maseni odnosi između cementa, hidratisanog kreča i agregata iznosili su 1:2:9, respektivno.

Količina vode je usvojena na takav način da obezbedi adekvatno mešanje i ugrađivanje maltera. Pritom su usvajane relativno niže vrednosti mase vode, pa je konzistencija maltera kod svih serija mogla da se okarakterise kao plastična (sa rasprostiranjem ispod 140 mm, kada su u pitanju malteri za zidanje) [7]. Sastavi mešavina, vodovezivni faktori i zapreminske mase u svežem ($\gamma_{m,sv}$) i očvrslom stanju pri starosti od 28 dana ($\gamma_{m,28}$) prikazani su u tabeli 1.

Vrsta maltera	K	KO	P1	P2	C
Hidratisani kreč (kg/m ³)	421	362	382	298	-
Cement (kg/m ³)	-	-	191	149	512
Agregat (0-4 mm) (kg/m ³)	1263	1085*	1147	1341	1537
Voda (kg/m ³)	327	401	331	307	267
Vodovezivni faktor (kg/m ³)	0,777	1,108	0,578	0,686	0,521
$\gamma_{m,sv}$ (g/cm ³)	2,026	1,830	2,096	2,131	2,279
$\gamma_{m,28}$ (g/cm ³)	1,711	1,449	2,102	1,926	2,231

* Agregat u mešavini KO čine 521 kg/m³ drobljenog krečnjačkog agregata (0/1 mm) i 564 kg/m³ agregata od drobljene opeke (1/4 mm).

Tabela 1. Sastav i vrednosti zapreminske mase ispitivanih serija maltera

Proces spravljanja malterskih mešavina započet je mešanjem čvrstih komponenata (veziva i agregata) u trajanju od 1 min, da bi se zatim postepeno dodavala potrebna količina vode. Ukupno trajanje mešanja iznosilo je 5 min za svaku od mešavina, pri čemu je nakon 3 min nastupila pauza u mešanju u trajanju od 30 s. Malteri su zatim ručno ugrađivani u standardne trodelne kalupe. Tokom prva 24 h uzorci su čuvani u vodenom kupatilu u uslovima relativne vlažnosti 95%. Zatim su uzorci izvađeni iz kalupa i do trenutka ispitivanja negovani u skladu sa SRPS U.M8.002 [14]. Prema navedenom standardu malteri serija K i KO su negovani na vazduhu u laboratorijskim uslovima, dok su malteri serija P1 i P2 negovani 7 dana na vazduhu, a potom u vodi. Malteri serije C negovani su u vodi od trenutka vađenja iz kalupa.

3. SPROVEDENA EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

3.1. Ispitivanja maltera u svežem i očvrslom stanju

Na malterima u svežem stanju ispitana je zapreminska masa svežeg ugrađenog maltera (tabela 1). Najnižu vrednost zapreminske mase (1,830 g/cm³) imao je malter oznake KO, a najvišu (2,279 g/cm³) malter oznake C. Niska vrednost zapreminske mase maltera oznake KO može se objasniti prisustvom lakših zrna opeke u svojstvu agregata, dok je zapreminska masa maltera oznake C najviša iz razloga što su kod ovog maltera

upotrebljeni drobljeni agregat (oko 72% više zapreminske mase zrna u odnosu na opeku) i cement u svojstvu veziva (oko 32% više specifične mase u odnosu na kreč). Malteri oznake K, P1 i P2 posedovali su zapreminsku masu koja se kretala između dve pomenute vrednosti, u granicama 2,026–2,131 g/cm³.

Ispitivanja na malterima u očvrslom stanju obuhvatila su ispitivanje sledećih fizičko-mehaničkih svojstava: zapreminska masa očvrsllog maltera, čvrstoća pri savijanju i čvrstoća pri pritisku maltera i brzina ultrazvučnog impulsa kroz malter [11, 13, 14]. Sva ispitivanja obavljena su na uzorcima oblika prizme dimenzija 4×4×16 cm, pri različitim starostima.

Promena vrednosti zapreminske mase maltera praćena je u periodu od 28 dana (konačne vrednosti prikazane su u tabeli 1). Kod ispitivanih maltera došlo je do zadržavanja ili pada vrednosti zapreminske mase u funkciji od vremena. Malteri negovani na vazduhu (malteri oznake K i KO) pokazali su značajniji pad vrednosti zapreminske mase, dok kod maltera negovanih u vodi (malteri oznake P1, P2 i C) ovaj efekat nije bio izražen, tj. nije došlo do značajne promene vrednosti zapreminske mase. Pad vrednosti zapreminske mase (koji je iznosio 15,5% i 20,8% za maltere oznake K i KO, respektivno) se može povezati sa promenom (gubitkom) sadržaja vode u malterima. Najizraženija vrednost pada zapreminske mase zabeležena je kod maltera oznake KO, što se može povezati sa gubitkom sadržaja vode u obe komponente maltera, kako u vezivu, tako i u zrnima drobljene opeke, koja su takođe upila značajnu količinu vode tokom spravljanja maltera (upijanje vode kod materijala opeke iznosilo je oko 16,2%, dok je kod drobljenog agregata zabeleženo upijanje vode reda veličine 0,15%).

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri pritisku pri starostima od 14, 21 i 28 dana prikazani su u tabeli 2. Kao što je i očekivano, krečni malteri (oznake K i KO) su dostigli najniže vrednosti čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri pritisku. Ove mehaničke karakteristike kod produžnih maltera (oznake P1 i P2) bile su više, dok su kod cementnog maltera (oznake C) one bile najviše.

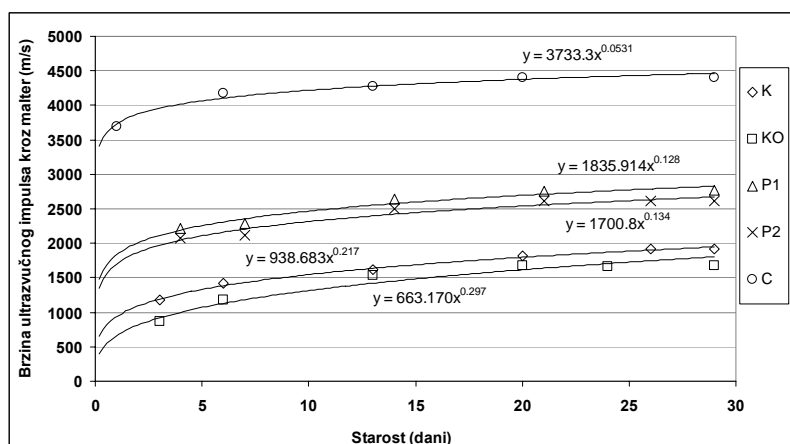
Serija	Čvrstoća pri savijanju (MPa)			Čvrstoća pri pritisku (MPa)		
	14 dana	21 dan	28 dana	14 dana	21 dan	28 dana
K	0,25	0,63	0,67	0,68	0,72	1,21
KO	0,25	0,50	0,67	0,72	0,83	1,27
P1	1,13	1,44	1,50	4,28	5,00	5,08
P2	1,13	1,13	1,25	2,98	3,28	4,38
C	9,63	10,50	10,75	47,81	48,13	52,60

Tabela 2. Vrednosti ispitivanih mehaničkih svojstava maltera pri različitim starostima

Pri svim starostima, čvrstoće pri savijanju cementnog maltera bile su 7,2-9,3 puta više nego kod produžnih, odnosno 16,0-38,5 puta više nego kod krečnih maltera. Slično, čvrstoće pri pritisku cementnog maltera, pri svim starostima, bile su 9,6-16,0 puta više u odnosu na čvrstoće pri pritisku produžnih, odnosno 41,4-70,3 puta više u odnosu na odgovarajuće vrednosti kod krečnih maltera. Sa povećanjem starosti, može se primetiti da je ovaj odnos opadao u izvesnoj meri, tj. da je došlo do izvesnog približavanja

konačnih vrednosti, kako u slučaju čvrstoće pri savijanju, tako i u slučaju čvrstoće pri pritisku maltera.

Promena vrednosti brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz uzorke maltera praćena je u periodu od 28 dana. Vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kroz uzorke, pri različitim starostima, prikazane su na slici 2, zajedno sa odgovarajućim regresionim krivama.



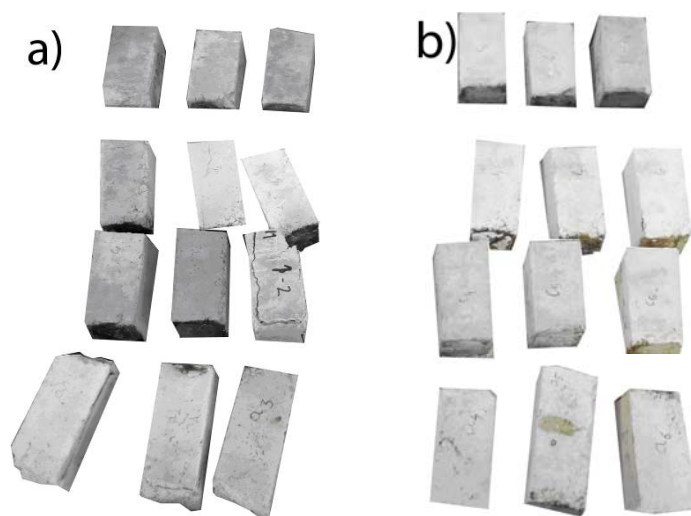
Slika 2. Brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz ispitivane maltere

Brzina prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz ispitivane maltere kretala se u širokom opsegu od 1500-4500 m/s, pri starosti od 28 dana. Na bazi rezultata sprovedenih ispitivanja, predmetni malteri se mogu podeliti u tri grupe: u prvu grupu spadaju malteri kod kojih je u svojstvu veziva upotrebljen kreč (oznake K i KO), u drugu grupu spadaju malteri kod kojih su u svojstvu veziva upotrebljeni cement i kreč u određenom odnosu (oznaka P1 i P2) i cementni malter (oznake C). Poredak izmerenih vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa za ispitivane serije uzoraka u skladu je sa izmerenim vrednostima zapreminskih masa u očvrslom stanju. Pritom, veća odstupanja brzine prostiranja ultrazvučnih talasa između pomenute tri grupe maltera, pre svega, posledica su različitih uslova nege. Kao što je već pomenuto, uzorci cementnog maltera su sve vreme negovani u vodi, pa su u trenutku predmetnog ispitivanja šupljine u malteru bile ispunjene vodom, za razliku od krečnih maltera, koji su nakon 24h od trenutka spravljanja negovani na vazduhu u laboratorijskim uslovima.

3.2. Ispitivanje efekata termičkog tretmana maltera

Termički tretman uzoraka maltera (tri prizme dimenzija 4×4×16 cm za svaku seriju maltera) obavljen je pri starosti maltera od 28 dana, a nakon sušenja uzoraka maltera na temperaturi od 105°C. Temperatura od 600°C izabrana je kao gornja granična vrednost temperature pri zagrevanju, nakon koje dolazi do većih oštećenja i pada vrednosti mehaničkih karakteristika maltera. Prirast temperature je bio takav da je u roku od 90 min postignuta zadata vrednost temperature, a zatim su uzorci, nakon održavanja postignute temperature u trajanju od 30 min, hlađeni u samom uređaju tokom narednih 20 sati.

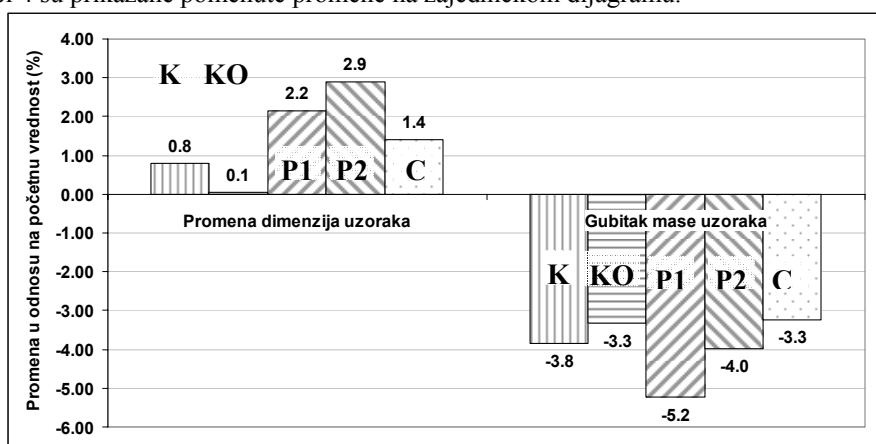
Na slici 3 je prikazan izgled uzoraka izloženih termičkom tretmanu i njima odgovarajućih uzoraka (etalona), koji su negovani na vazduhu ili u vodi, nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju.



Slika 3. Uzorci a) izloženi i b) neizloženi tretmanu, nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju

Na uzorcima maltera je praćena promena sledećih fizičko-mehaničkih svojstava: dimenzija, mase i brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa. Vršeno je i poređenje čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri pritisku maltera.

Promena dimenzija (povećanje dimenzija) uzoraka pre i posle izlaganja temperaturi od 600°C (pri starosti od 28 dana), kao i promena mase uzoraka, određena je na bazi merenja dimenzija, odnosno mase istih uzoraka pre i posle izlaganja pomenutoj temperaturi. Na osnovu izmerenih vrednosti, izračunate su vrednosti procentalnog povećanja dimenzija, odnosno gubitka mase, nakon izlaganja visokoj temperaturi. Na slici 4 su prikazane pomenute promene na zajedničkom dijagramu.



Slika 4. Promena dimenzija i pad mase izmeren na uzorcima svih serija (u %)

Kod ispitivanih maltera došlo je do povećanja dimenzija uzoraka, prouzrokovanih unutrašnjim naponima pri zagrevanju i konsekvntnim prslinama i mikroprrslinama. Ovo povećanje dimenzija kretalo se u granicama od 0,1% (za malter oznake KO) do 2,9% (za malter oznake P2).

Što se tiče gubitka mase, kod svih maltera došlo je do gubitka mase uzoraka, usled hemijskih promena koje su se dešavale unutar uzoraka pri zagrevanju (razdvajanja i oksidacije hidratiranih faza materijala). Otpadanje materijala usled povećanja temperature bilo je zanemarljivo kod svih uzoraka. Izuzev maltera oznake P1, kod koga je gubitak mase iznosio 5,2%, kod svih ostalih vrsta maltera te vrednosti su bile prilično ujednačene i iznosile su oko 3,5%.

Čvrstoća pri savijanju i čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28 dana ispitivane su na uzorcima izloženim temperaturi od 600°C, kao i na neizloženim uzorcima (etalonima). Rezultati ispitivanja ovih mehaničkih karakteristika ispitivanih serija maltera prikazani su u tabeli 3, zajedno sa procentualnim odstupanjem (padom) u odnosu na etalone.

Generalno posmatrano, efekat zagrevanja bio je izraženiji u slučaju čvrstoće pri savijanju, gde je najveći pad usled zagrevanja do temperature od 600°C zabeležen kod produžnih maltera oznake P1 i P2 (oko 95%), dok je najveću otpornost na termičke uticaje u tom smislu pokazao cementni malter oznake C (pad od 56,6%). Čvrstoća pri pritisku opala je usled zagrevanja u najvećoj meri (oko 83%) kod produžnih maltera (oznake P1 i P2), dok su najmanji pad čvrstoće pri pritisku imali uzorci maltera (oznake K i KO) izrađeni sa krečom (pad od oko 18%).

Serija	Čvrstoća pri savijanju (MPa)			Čvrstoća pri pritisku (MPa)		
	Neizloženi	Izloženi	Pad (%)	Neizloženi	Izloženi	Pad (%)
K	0,67	0,24	63,8	1,21	1,00	17,2
KO	0,67	0,13	81,3	1,27	1,02	19,7
P1	1,50	0,07	95,6	5,08	0,81	84,0
P2	1,25	0,06	95,3	4,38	0,81	81,4
C	10,75	4,67	56,6	52,60	21,88	58,4

Tabela 3. Uporedni prikaz mehaničkih svojstava tretiranih i netretiranih uzoraka maltera

Na uzorcima koji su zagrevani do temperature od 600°C izmerena je brzina prostiranja ultrazvučnog impulsa pre i posle zagrevanja. Rezultati ovog ispitivanja, zajedno sa procentualnim padom vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa, u odnosu na vrednost pre zagrevanja, dati su u tabeli 4.

	Pre zagrevanja	Posle zagrevanja	Pad vrednosti (%)
K	1918	852	55,6
KO	1667	899	46,1
P1	2772	475	82,8
P2	2104	334	84,1
C	4228	2532	40,1

Tabela 4. Uporedni prikaz brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa (m/s) kod ispitivanih maltera

Vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih maltera, posle izlaganja temperaturi od 600°C, pale su od 40,1% (za malter oznake C) do 84,1% (za malter oznake P2). Kao i kod uzoraka koji su negovani na sobnoj temperaturi, na osnovu pada brzine ultrazvučnog impulsa, predmetni malteri se mogu podeliti u tri grupe: prvu grupu maltera (sa prosečnim padom vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa od oko 50%) čine malteri sa krečom (oznake K i KO), drugu grupu maltera (sa prosečnim padom vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa od oko 83%) čine produžni malteri (oznake P1 i P2), dok je kod maltera oznake C ovaj pad najniži (40,1%). Najveće promene izmerene na uzorcima produžnog maltera najverovatnije su posledica razlaganja produkata očvršćavanja cementa i kreča, kao i izvesne termičke nekompatibilnosti komponenata, te je nakon termičkog tretmana došlo do formiranja većeg broja prslina i pukotina u materijalu, u odnosu na druge dve grupe maltera.

Napominje se da, iako uslovi hlađenja uzoraka mogu da utiču na ponašanje maltera izloženih dejstvu visokih temperatura, kao i reakcije ekspanzivnih jedinjenja (CaO, MgO) sa vlagom iz vazduha, ove pojave nisu uključene u rezultate ispitivanja prikazane u okviru ovog rada.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih rezultata ispitivanja može se zaključiti da je nakon termičkog tretmana kod svih vrsta maltera došlo do povećanja dimenzija i gubitka mase uzoraka. S obzirom da nije došlo do izrazite pojave otpadanja materijala sa površine uzorka i da je kao agregat korišćen krečnjački kamen, koji je stabilan na temperaturama nižim od 600 °C, ove pojave se mogu pripisati, pre svega, gubitku vode iz uzoraka i hemijskim reakcijama razlaganja produkata očvršćavanja cementa i kreča.

Cementni malteri su, kako je i očekivano, pokazali najbolja fizičko-mehanička svojstva i pre i nakon izlaganja povišenim temperaturama. Međutim, primećeno je da je kod maltera koji su u svom sastavu kao vezivo imali samo hidratizirani kreč došlo do procentualno najmanjeg pada vrednosti čvrstoća pri pritisku (17,2% i 19,7%) u odnosu na ostale vrste maltera, a posebno u odnosu na produžne maltere kod kojih je pad čvrstoća pri pritisku iznosio čak 84,0% i 81,4%. Može se zaključiti, dakle, da su razlaganje produkata hidratacije cementa i termička nekompatibilnost produkata očvršćavanja cementa i kreča u najvećoj meri doprineli lošijim rezultatima produžnih maltera u odnosu na ostale vrste ispitivanih maltera. Kombinacija razlaganja produkata očvršćavanja cementa i kreča, kao i termička nekompatibilnost produkata očvršćavanja cementa i kreča (kod produžnih maltera), usled koje je na visokim temperaturama došlo do formiranja većeg broja pukotina u materijalu u odnosu na druge dve grupe maltera, najverovatnije predstavljaju glavne uzroke smanjenja brzina prostiranja ultrazvučnog impulsa koji se propagiraju kroz uzorke produžnog maltera nakon njihovog izlaganja visokim temperaturama. Pritom, brzina prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz tretirane serije maltera ne prati čvrstoću pri pritisku, kao što bi se očekivalo.

S obzirom na male promene dimenzija uzoraka krečnih maltera (K i KO), koje su iznosile 0,8% i 0,1% u odnosu na početne dimenzije, može se smatrati da ovi malteri neće unositi dodatna naprezanja u konstrukciju usled povećanja svojih dimenzija pri požaru. Iako su na ovim malterima dobijene niske vrednosti čvrstoća pri pritisku na 28 dana (marka maltera M1), oni su zadovoljili istu marku maltera i nakon dejstva visoke temperature.

5. REFERENCE

- [1] Cree D., Green M., Noumowe A.: Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review, *Construction and Building Materials* 45, 2013, str. 208-223
- [2] Henry A., Stewart J.: *English Heritage practical building conservation. Mortars, renders & plasters*, Farnham ; Burlington : Ashgate, 2011.
- [3] Jevtić, D.: Odredbe aktuelne regulative iz oblasti zaštite od požara zidanih konstrukcija - Evrokod 6 - Deo 1-2, V naučno-stručno savetovanje "Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja", Savez građevinskih inženjera i tehničara Srbije, Zlatibor, 29. maj - 1. jun 2007, str. 453-460,
- [4] Jevtić, D.: Uticaj vrste agregata i prisustva mikroarmature na fizičko-mehanička svojstva tradicionalnih matera, Fasade i krovovi u zgradarstvu, savremeni i tradicionalni materijali i sistemi u funkciji energetske efikasnosti, trajnosti i estetike, zbornik radova, Beograd 25. oktobar 2013. godine, str. 69-82.,
- [5] Jevtić D., Markičević J, Savić A.: The Change of Physical and Mechanical Properties of Fiber Reinforced Cement-Lime Mortars, V Internacionalni naučno-stručni skup Građevinarstvo - nauka i praksa, Žabljak, 17-21. februar 2014, Zbornik radova, Izdavač: Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, pp. 941-946,
- [6] Maravelaki-Kalaitzaki P., Bakolas A., Moropoulou A.: Physico-chemical study of Cretan ancient mortars, *Cement and Concrete Research* 33, 2003, str. 651–661
- [7] Muravljev M.: *Građevinski materijali*, Beograd, 2000.
- [8] Muravljev, M., Jevtić, D.: ENV 1996, Evrokod EC 6 - Proračun zidanih konstrukcija, Deo 1-2: Proračun konstrukcija za dejstvo požara, editor M. Muravljev, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1997, str. 155-181, ISBN 86-80049-54-9
- [9] Ruvalcaba Ayala, F.R.: *Mechanical Properties and Structural Behaviour of Masonry at Elevated Temperatures*, PhD Thesis, The University of Manchester, 2010.
- [10] Terzić A.: *Uticaj mikrostrukture na svojstva vatrostalnih betona*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko – metalurški fakultet, Beograd, 2009.
- [11] SRPS EN 196-1:2008: Metode ispitivanja cementa - Deo 1: Ispitivanje čvrstoće
- [12] SRPS EN 1996-1-2:2012: Evrokod 6 -- Projektovanje zidanih konstrukcija -- Deo 1-2: Opšta pravila -- Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara
- [13] SRPS U.M1.042:1998: Beton - Očvrsljeni beton - Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa
- [14] SRPS U.M8.002:1997: Malteri za zidanje i malterisanje – metode ispitivanja