

## MIKROARMIRANI MALTERI I BETONI - MOGUĆNOST POBOLJŠANJA FIZIČKO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA

Dragica JEVTIĆ  
Dimitrije ZAKIĆ

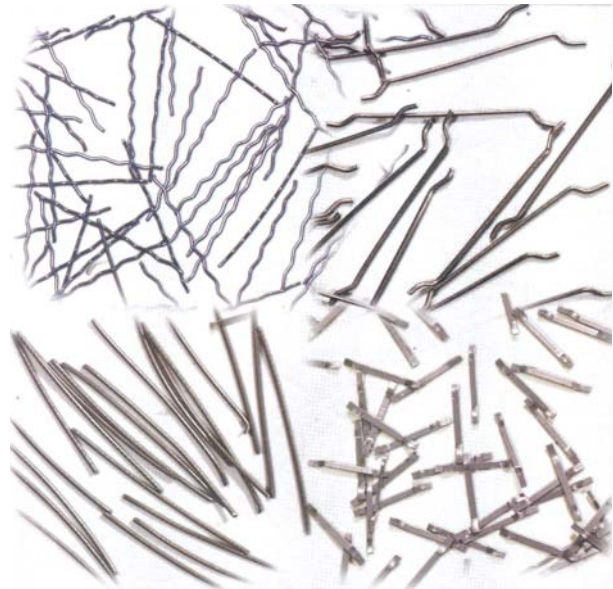
ORIGINALNI NAUČNI RAD  
UDK: 666.971.4.982.2 = 861

### 1. UVOD

Savremeni trendovi u građevinarstvu zahtevaju uvođenje i razvijanje novih tehnologija – u cilju projektovanja i građenja kvalitetnijih, trajnijih i ekonomičnijih konstrukcija. To, svakako, podrazumeva i upotrebu novih građevinskih materijala sa boljim fizičko-mehaničkim, reološkim, tehnološkim, eksploatacionim i drugim svojstvima u odnosu na već postojeće, uobičajene materijale. Jedan od značajnih produkata ovakvog razvojnog trenda u oblasti građevinarstva je i tzv. mikroarmirani beton, tj. beton sa dodatkom vlakana koja predstavljaju svojevrsnu mikroarmaturu [12, 17]. U ovu, relativno široku grupu kompozita, možemo svrstati i maltere sa dodatkom različitih vlakana, s obzirom da betoni i malteri po svom sastavu, strukturi, tehnologiji proizvodnje i najvećem broju fizičko-mehaničkih svojstava pripadaju istoj kategoriji građevinskih materijala.

Dakle, mikroarmirani betoni i malteri predstavljaju kompozitne materijale dobijene ojačanjem cementne matrice pomoću ravnomerno dispergovanih čeličnih, sintetičkih, staklenih i drugih tipova vlakana. Ovo su složeni kompoziti kod kojih se na planu makro strukture jasno mogu izdvojiti dve komponente: osnovni materijal – matrica i dodatni materijal – mikroarmatura čiji je glavni zadatak da obezbedi poboljšanje određenih svojstava osnovnog materijala [4, 15]. Pri tome, najčešće kao osnovni materijal figuriše cementna matrica, dok se kao mikroarmatura javljaju na pr. čelična (sl. 1) ili polimerna vlakna (polipropilenska, polietilenska, najlonska, poliakrilnitrilna i sl.) [20]. Namena vlakana, kao dodatka osnovnom materijalu, je da poboljšaju neka svojstva složenog materijala – kompozita, što može da bude od izuzetnog značaja za njegovu praktičnu primenu. U suštini, vlakna imaju višestruku funkciju - pri čemu je njihov doprinos najznačajniji u oblasti povećanja čvrstoće

i duktilnosti kompozita, uz istovremeno smanjenje zapreminskih deformacija skupljanja [7, 28, 30].



Slika 1. Izgled različitih čeličnih vlakana

### 2. SVOJSTVA MIKROARMIRANIH KOMPOZITA

Pod pojmom mikroarmirani betoni i malteri obično se podrazumevaju kompoziti bazirani na upotrebi sitnog agregata (peska) krupnoće od 0/4 mm, krupnog agregata (maksimalne krupnoće zrna do 16 mm), zatim veziva (pri čemu se uglavnom radi o cementu), uz dodatak neke vrste mikroarmature - vlakana. Količina vlakana koja se primenjuje kod ovakvih kompozita značajno varira, u zavisnosti od vrste vlakana i željenih svojstava betona, odnosno maltera, i kreće se u rasponu od 0,1% pa sve do 5% u odnosu na ukupnu zapreminu. Na primer, uobičajene količine čeličnih vlakana variraju između 20 i 80 kg po 1m<sup>3</sup> svežeg ugrađenog betona (što

#### Adrese autora:

V. prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn., Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd  
Asist. mr Dimitrije Zakić, dipl.inž.građ., Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

predstavlja 0,25-1,0% zapreminski). Što se tiče upotrebe polimernih vlakana, uglavnom se preporučuje niži sadržaj ovog tipa mikroarmature, limitiran u većini slučajeva na svega 0,1-0,2%, tj. na oko 1-2 kg/m<sup>3</sup> svežeg ugrađenog betona (ili maltera) [10, 29, 31].

Prilikom spravljanja mikroarmiranih betona i maltera, potrebno vreme mešanja treba u najmanju ruku duplirati u odnosu na uobičajeni postupak spravljanja klasičnih kompozita (bez dodatka vlakana). Objašnjenje za ovakvu preporuku leži u činjenici da je, za postizanje maksimalnih efekata mikroarmiranja, nužno obezbediti što je moguće ravnomerniju disperziju vlakana u svim pravcima i po celoj zapremini mešavine.

Kada se mikroarmirani betoni i malteri spravljaју uz primenu relativno malih količina vlakana (do 1% u odnosu na ukupnu zapreminu), prisustvo te mikroarmature u principu ne utiče značajnije na promenu ugradljivosti i obradljivosti svežih mešavina. Naravno, pri korišćenju većih količina vlakana po jedinici zapremine, ovom problemu treba posvetiti mnogo veću pažnju. U takvim situacijama podrazumeva se upotreba aditiva tipa superplastifikatora, kao i moćnih mehaničkih sredstava za kompaktiranje svežih mešavina pomoću vibracija [5, 13].

Što se tiče tipa i dimenzija primenjenih vlakana, ispitivanja su pokazala da monofilamentna (pojedinačna) polipropilenska vlakna (videti sl. 2) više utiču na promenu ugradljivosti i obradljivosti svežih mešavina nego fibrilizovana (međusobno povezana) vlakna. Isti efekat primećen je i prilikom upotrebe vlakana manjeg prečnika i većih dužina, tj. vlakana sa većim faktorom oblika ( $l/d$ ). Ovo se može objasniti činjenicom da se broj vlakana u jedinici zapremine značajno povećava sa porastom faktora oblika, a naročito ukoliko je reč o monofilamentnim vlaknima [2, 3, 6].

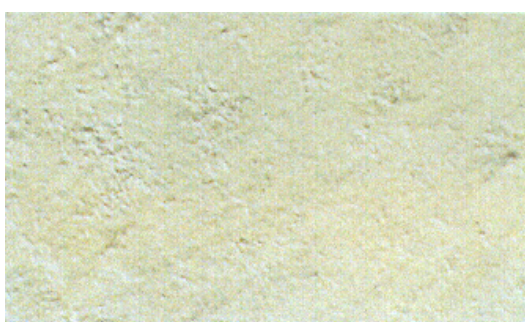
Uopšteno posmatrano, jasno je da se dodavanjem izvesne količine vlakana u svežu mešavinu menja konzistencija betona (odnosno maltera), pri čemu sama me-

šavina postaje inertnija i kruća, tj. smanjuje se njena pokretljivost. Ovaj efekat pojačava se sa povećanjem količine upotrebljenih vlakana, ali i sa povećanjem faktora oblika ( $l/d$ ), kao i sa porastom veličine nominalno najkрупnijeg zrna agregata ( $D$ ) [12].

Što se tiče mehaničkih svojstava mikroarmiranih kompozita, povećanje čvrstoće pri pritisku je slabo izraženo, što se objašnjava pre svega relativno niskim procentualnim učešćem vlakana u okviru mešavine. Takođe, i promene vrednosti modula elastičnosti mikroarmiranih kompozita su zanemarljivo male u odnosu na kompozite spravljene bez vlakana, nezavisno od vrste i količine ovih dodataka. S druge strane, mikroarmatura uglavnom doprinosi značajnom porastu duktilnosti betona i maltera, kako prilikom upotrebe čeličnih, tako i kod primene polimernih i drugih tipova vlakana. Ispitivanja su pokazala da je ova pojava više izražena kod maltera nego kod betona sa sličnim sastavom. Efekat povećanja duktilnosti (žilavosti) prilikom ispitivanja čvrstoće pri pritisku kod mikroarmiranih u odnosu na klasične betone, može se videti na sl. 3 [19, 21, 23].

S obzirom na uobičajeno niske vrednosti čvrstoće pri zatezanju, čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri smicanju kod klasičnih maltera i betona, njihovo armiranje vlaknima doprinosi kudikamo značajnijem povećanju ovih svojstava, nego što je to slučaj kod čvrstoće pri pritisku. Štaviše, jedan od osnovnih i najvažnijih motiva za primenu vlakana kao mikroarmature upravo leži u nastojanju da se poboljšaju pomenute mehanička svojstva predmetnih kompozita.

Prisustvo vlakana u okviru cementnog kamena smanjuje apsorpciju vode, a samim tim povećava otpornost kompozita na dejstvo mraza, kao i otpornost na penetraciju soli za odmrzavanje, što je od posebnog značaja kod konstrukcija tipa mostova, kolovoznih ploča i aerodromskih pista. Takođe, dodatak mikroarmature doprinosi i smanjenju zapreminskih dilatacija skupljanja, a naro-



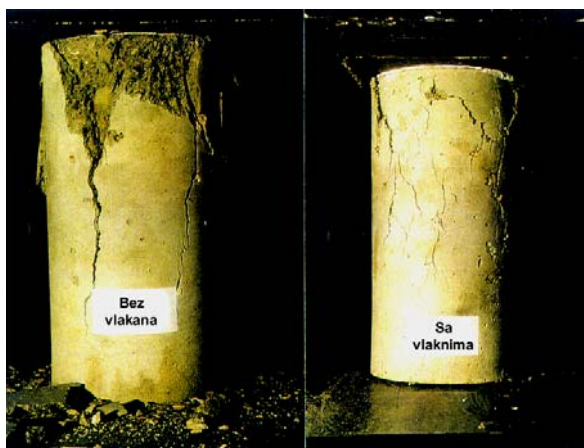
a)

b)

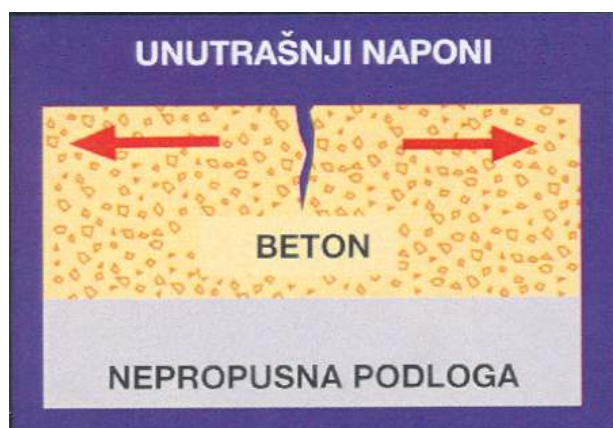
Slika 2. Izgled pojedinačnih a) monofilamentnih i b) fibrilizovanih vlakana



čito plastične komponente ove reološka svojstva betona i maltera, o čemu govore i eksperimentalni rezultati samih autora koji će biti prikazani u daljem tekstu. Redukcijom zapreminskih deformacija skupljanja, kao i delovanjem u pravcu smanjenja broja prslina i njihovih dimenzija, vlakna dodatno zatvaraju moguće puteve za prodor vode i drugih štetnih materija u unutrašnjost kompozita, sl. 4 [33]. Ukoliko kao ilustraciju uzmemo monofilamentna polipropilenska vlakna, možemo da kažemo da ona svojim izuzetno velikim brojem u jedinici zapremine (više stotina miliona u  $1\text{ m}^3$ ), svojim ravnomernim dispergovanjem u svim pravcima i veoma malim dimenzijama, uspešno presecaju sistem otvorenih kapilarnih pora preko koga se vrši komunikacija između kompozita i spoljašnje sredine. Na taj način, kod sasvim mladih maltera i betona sprečava se nekontrolisano izdvajanje vode na površini (tzv. "bleeding") - pojava koja je veoma loša sa stanovišta otpornosti kompozita na dejstvo mraza, videti sl. 5. Naime, zajedno sa vodom na površini se izdvajaju i najfinije čestice cementa i agregata, stvarajući pri tome površinski film slabih mehaničkih svojstava, koji je samim tim izuzetno osetljiv na niskim temperaturama. Ukoliko se proces smrzavanja i odmrzavanja ciklički ponavlja, vrlo brzo može doći do nastanka ozbiljnih prslina, a zatim i do mrvljenja, krunjenja i otpadanja površinskog sloja kompozita.



Slika 3. Betonski cilindri nakon ispitivanja čvrstoće pri pritisku: kompozit bez dodatka vlakana (levo) i mikroarmirani beton (desno)



Slika 4. Uticaj mikroarmature na kontrolu prslina

Osim na već pomenuta svojstva, dodatak vlakana može da doprinese povećanju otpornosti na habanje kompozita, boljoj atheziji za podlogu na kontaktu "starog" i "novog" betona, povećanoj otpornosti pri dinamičkim uticajima, smanjenju reoloških deformacija (skupljanja i tečenja), povećanju otpornosti na dejstvo požara i dr. [3].

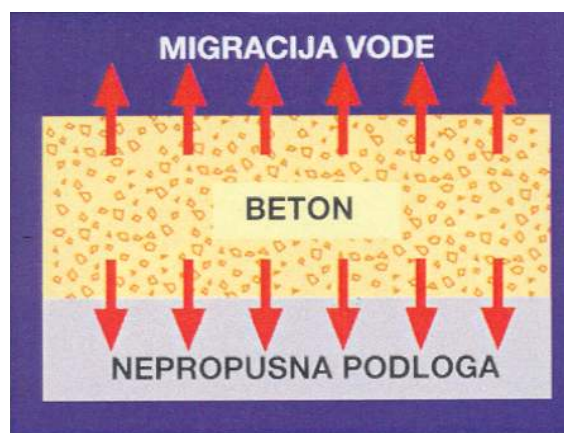
### 3. PRIMERI POBOLJŠANJA PERFORMANSI BETONA I MALTERA PUTEM MIKROARMIRANJA ČELIČNIM I POLIMERNIM VLAKNIMA

U daljem tekstu biće prikazani rezultati sopstvenih eksperimentalnih istraživanja vezanih za problematiku mikroarmiranja, a koja su obavljena u okviru Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Radi se o ispitivanjima mikroarmiranog betona i maltera sa dodatkom čeličnih vlakana (proizvođač: "Spajić", Srbija), zatim o ispitivanjima reoloških svojstava maltera na bazi klasičnog agregata i dodatka monofilamentnih polipropilenskih vlakana (proizvođač: "Fibrin", Velika Britanija), i konačno o ispitivanjima maltera na bazi reciklirane opeke kao agregata i dodatka monofilamentnih polipropilenskih vlakana (proizvođač: "Fibrin", Velika Britanija).

#### 3.1 Mikroarmirani beton na bazi čeličnih vlakana

U cilju utvrđivanja uticaja čelične mikroarmature domaćeg porekla proizvedene od strane firme "Spajić" na svojstva svežeg i očvrslog betona, u okviru Laboratorije za materijale Građevinskog fakulteta u Beogradu izvršena su komparativna ispitivanja dva tipa betona: etalona (betona bez dodatka vlakana) i mikroarmiranog betona (betona sa dodatkom čeličnih vlakana). Prilikom izbora vrste i količine mikroarmature za predmetna ispitivanja, vođeno je računa o osnovnim parametrima koji utiču na kvalitet betona, a pre svega o faktoru oblika ( $l/d$ ), koji predstavlja odnos između dužine ( $l$ ) i prečnika ( $d$ ) vlakana.

Imajući napred navedeno u vidu, a na bazi prethodnih iskustava u vezi sa mikroarmiranim kompozitima tipa maltera i betona, odabrana su vlakna savijena na krajevima, dimenzija  $30 \times 0,6\text{ mm}$  (faktor oblika  $l/d = 50$ ) u količini od  $25\text{ kg/m}^3$  (0,3% u odnosu na zapreminu). Oblik

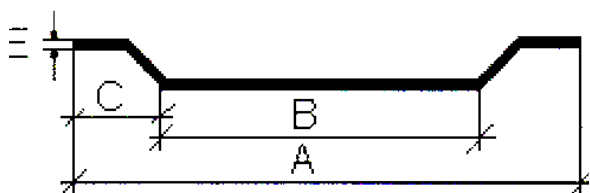


Slika 5. Uticaj mikroarmature na izdvajanje vode (bleeding)

predmetnih vlakana prikazan je na slici 6, a podaci u vezi sa njihovim dimenzijama i osnovnim fizičko-mehaničkim svojstvima (deklarisani od strane proizvođača), dati su u okviru tabele 1.

Tabela 1. Osnovna svojstva vlakana deklarirana od strane proizvođača - firme "SPAJIĆ"

PARAMETRI	DEKLARISANA SVOJSTVA
Vrsta i oblik	Čelična vlakna savijena na krajevima
Poprečni presek	Kružni
Čvrstoća pri zatezanju	min. 1100 MPa
Tačka topljenja	cca. 1500°C
Ugao savijanja na krajevima	min. 45°
Ukupna dužina (A)	30 ± 2 mm
Debljina (E)	0,6 ± 0,1 mm
Dužina dela koji nije savijen (B)	20 ± 1 mm
Dužina savijenog dela (C)	4,5 ± 1 mm



Slika 6. Oblik čeličnih vlakana koja su korišćena kao mikroarmatura

Što se tiče usvojenih receptura, sastavi betona I (etalona) i betona II (mikroarmiranog betona) bili su identični, u smislu primenjenih vrsta i količina osnovnih komponentnih materijala - vode, cementa i agregata. Jedina razlika odnosila se na dodatak napred prikazanih čeličnih vlakana betonu oznake II, u količini od 25 kg/m<sup>3</sup> (tj. 0,3% u odnosu na zapreminu betona). S obzirom da se za spravljanje mikroarmiranih betona u principu koriste agregati sa krupnoćom zrna koja je manja nego kod klasičnih betona, odlučeno je da se za predmetna ispitivanja usvoji trofrakcijski rečni agregat "Moravac", sa nominalno najkrupnijim zrnom D=16 mm. Kao osnovni uslov kvaliteta betona usvojena je marka betona MB30, kao najčešće primenjivana marka u okviru armiranobetonskih konstrukcija. U funkciji praktične primene predmetnog betona usvojena je plastična konzistencija, što znači da je projektovana mera sleganja prema Abramsu iznosila 6-10 cm.

Postupak spravljanja mikroarmiranog betona (serija II) donekle je bio modifikovan u odnosu na standardni postupak koji je važio za beton bez dodatka vlakana (serija I) - a u cilju sprečavanja pojave nagomilavanja čeličnih vlakana, odnosno u cilju što boljeg dispergovanja mikroarmature po zapremini svežeg betona. S tim u vezi, polovina od ukupne količine vlakana dozirana je zajedno sa svim komponentama (cement i sve tri frakcije agregata) u mešalicu, nakon čega je mešanje trajalo 120 sekundi. Zatim je, tokom sledećih 60 sekundi mešanja betona, postepeno dodavana potrebna količina vode. Konačno, tokom narednih 120 sekundi mešanja

dozirana je i preostala količina čeličnih vlakana. Dakle, ukupno vreme mešanja u slučaju betona serije II iznosilo je 5 minuta (za razliku od standardnih 1-2 minuta).

Prilikom ispitivanja svežeg betona ustanovljeno je smanjenje sleganja od 1,5 cm kod mikroarmiranog betona (serija II) u odnosu na etalon (serija I), što se može se objasniti nešto krućom konzistencijom mešavine II usled dodatka čeličnih vlakana, kao i produženim vremenom mešanja u odnosu na mešavinu I. Međutim, i pored predmetne razlike u veličini sleganja, betonska mešavina sa dodatkom čeličnih vlakana lako se ugrađivala u kalupe, a slobodne površine betona su bile jednostavne za obradu. Betonska masa je bila kohezivna, nije primećena pojava segregacije prilikom utovara betona u kolica niti tokom njegovog ugrađivanja u kalupe, kao ni pojava izdvajanja ili nagomilavanja čeličnih vlakana. Vizuelnim pregledom sveže betonske mešavine ustanovljeno je da su vlakna uniformno raspoređena po zapremini svežeg betona, odnosno da su dispergovana podjednako u svim pravcima.

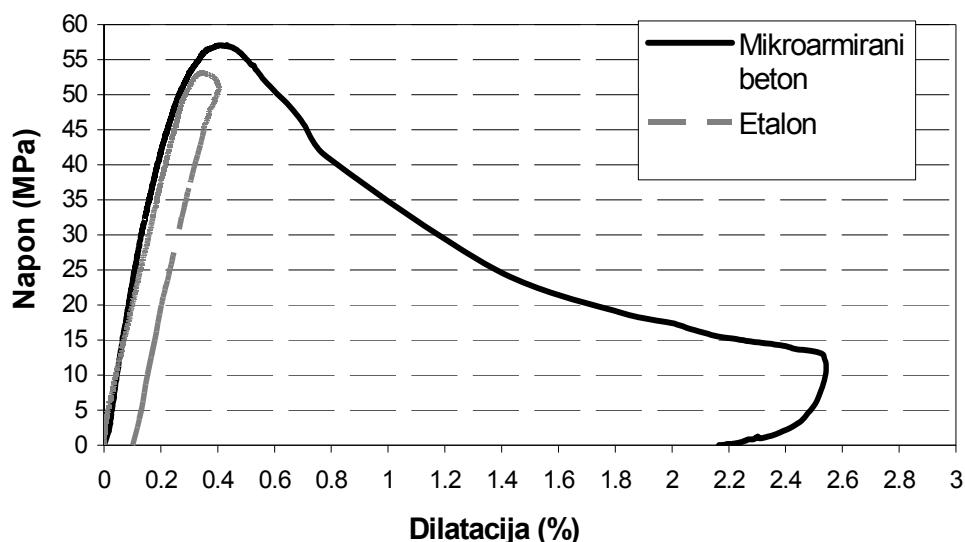
Što se tiče ispitivanja očvrslom betona, ona su obuhvatala pre svega određivanje važnijih fizičko-mehaničkih svojstava: zapreminske mase u očvrslom stanju, čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri smicanju, kao i utvrđivanje deformacionih svojstava: duktilnosti i  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagrama.

Ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava mikroarmiranog betona pokazala su, pre svega, značajno povećanje čvrstoće pri smicanju, koje je u konkretnom slučaju iznosilo cca 61% (u odnosu na etalon - beton bez dodatka vlakana), videti sl. 7. U nešto manjoj meri, dodatak čeličnih vlakana doprineo je i rastu čvrstoće pri savijanju betona (cca 17%), dok je njihov uticaj na čvrstoću pri pritisku bio znatno manji (cca 10%). Ovakvi rezultati bili su i očekivani s obzirom na ranija iskustva autora pri ispitivanju mikroarmiranih kompozita, a što je u skladu i sa relevantnom stručnom literaturom iz ove oblasti [11, 18, 32].



Slika 7. Dispozicija uzoraka za ispitivanje na smicanje

Što se tiče ispitivanja deformacionih svojstava, rezultati ispitivanja pokazali su da je armiranje cementne matrice čeličnim vlaknima "Spajić" doprinelo značajnom povećanju žilavosti i duktilnosti betona. Kao ilustracija ove tvrdnje, sa zajedničkog  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagrama (slika 8.) može se videti da je duktilnost mikroarmiranog betona - koja se



Slika 8.  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrami obe serije betona (I - etalona i II - mikroarmiranog betona)

može definisati i kao površina ograničena  $\sigma$ - $\varepsilon$  linijom i  $\varepsilon$ -osom, višestruko veća (cca 12 puta) od duktilnosti etalona, tj. betona bez dodatka vlakana.

Ostvareni rezultati još više dobijaju na značaju ako se uzme u obzir činjenica da se primenjena količina vlakana od  $25 \text{ kg/m}^3$  može smatrati minimalnim učešćem čelične mikroarmature kod kompozita tipa maltera i betona. Naime, realizovani pozitivni efekti bi svakako bili još izraženiji, ako bi se povećao sadržaj vlakana u okviru cementne matrice [23, 34].

### 3.2 Mikroarmirani malteri na bazi čeličnih vlakana

Dalje se prikazuju rezultati sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja, sprovedenih na dva tipa maltera – cementnih kompozita, izvršenih takođe u okviru Laboratorije za materijale Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Radi se, naime, o etalonskom malteru (oznaka "E") spravljenom bez dodatka vlakana i mikroarmiranom malteru (oznaka "V") spravljenom uz prisustvo čeličnih vlakana. Na ovim malterima – kompozitima ispitivane su mehaničke čvrstoće (čvrstoća pri savijanju i čvrstoća pri pritisku), koje su predmet razmatranja u okviru ovog rada.

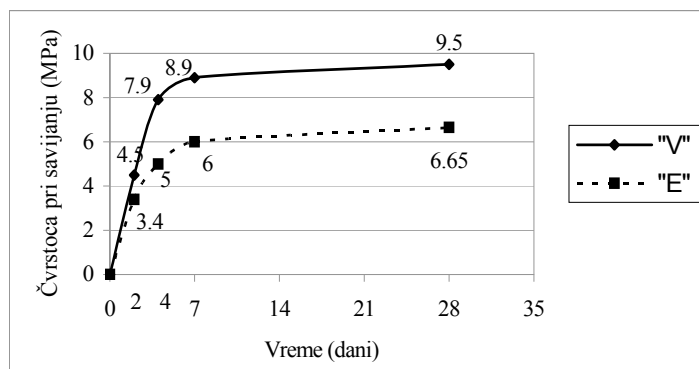
Usvojene recepture, odnosno sastavi maltera "E" (etalona) i maltera "V" (mikroarmiranog maltera), bile su identične u pogledu količina osnovnih komponentnih materijala: cementa, peska, ali, ovoga puta i silikatne prašine. Kod drugog tipa maltera (oznaka "V") bila je prisutna mikroarmatura u količini od  $60 \text{ kg/m}^3$  kao i dodatak tipa superplastifikatora. Prisustvo superplastifikatora bilo je potrebno iz razloga postizanja iste konzistencije ovog kompozita kao i kod etalonskog maltera. Količina vode bila je u obe mešavine ona koja odgovara rasprostiranju maltera od  $180 \pm 20 \text{ mm}$ .

Cement koji je primenjen za ovo eksperimentalno

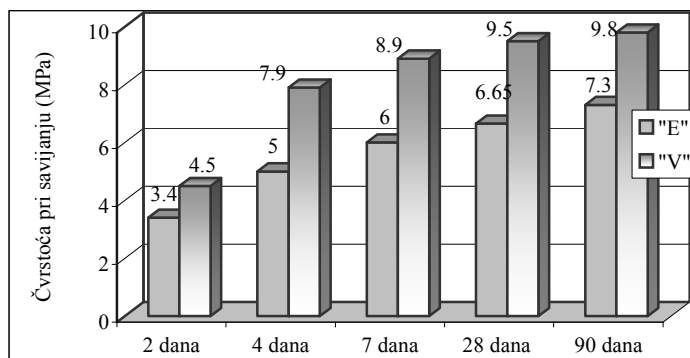
ispitivanje je čist portland cement CEM I 42,5 R proizveden u cementari "Lafarge" Beočin. Kao agregat za ispitivane maltere za obe serije odabran je standardni trofrakcijski (kvarcni) pesak. Njegove frakcije: I – 0/0,5mm, II – 0,50/1,00mm i III – 1,00/2,00mm bile su zastupljene u masenoj razmeri mešanja 1:1:1. Dakle, nominalno najkrupnije zrno agregata u mešavini bilo je  $D=2\text{mm}$ . Obe serije sadržavale su i dodatak silikatne prašine koja je dozirana u količini od 10 % u odnosu na masu cementa. Primenjen je hemijski dodatak tipa superplastifikatora pod nazivom "Glenijum 51" proizvođača MAC s.p.a, Treviso, Italija, u količini od 1% u odnosu na masu cementa. Ovaj hemijski dodatak nove generacije proizveden je na bazi karboksilnih eter polimera s dugim bočnim lancima koji omogućavaju održavanje postignute konzistencije u dužem vremenskom periodu.

Čelična vlakna koja su korišćena za mikroarmiranje su domaćeg porekla. Proizvođač je firma "Spajic", Kobišnica, Srbija. Usvojena su vlakna savijena na krajevima dimenzija  $30 \times 0,6 \text{ mm}$ , čiji faktor oblika iznosi  $l/d = 50$ , u količini  $60 \text{ kg/m}^3$  (0,45 % u odnosu na zapreminu) [18, 32].

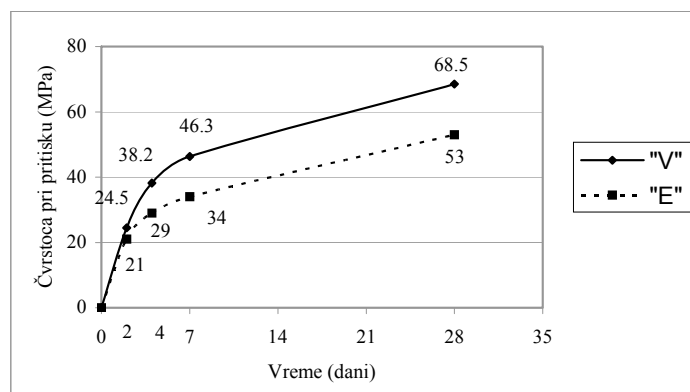
U cilju ispitivanja svojstava maltera, od svake vrste kompozita spravljeno je po 15 uzoraka oblika prizme, dimenzija  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ . Nega uzoraka sprovedena je na sledeći način: prvih 24 časa u kalupu i u vlažnom prostoru, a nakon toga do dana ispitivanja neprekidno u vodi. Komparativna ispitivanja vršena su na svežem malteru (određivanje zapreminske mase) i na očvrslom malteru (određivanje čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri pritisku), za starosti od 2, 4, 7, 28 i 90 dana. Rezultati ispitivanja, koji predstavljaju aritmetičku sredinu tri merenja, prikazani su u obliku dijagrama priraštaja čvrstoće u toku vremena (slika 8. i slika 10.), kao i u vidu uporednog prikaza u obliku histograma (na slikama 9. i 11.).



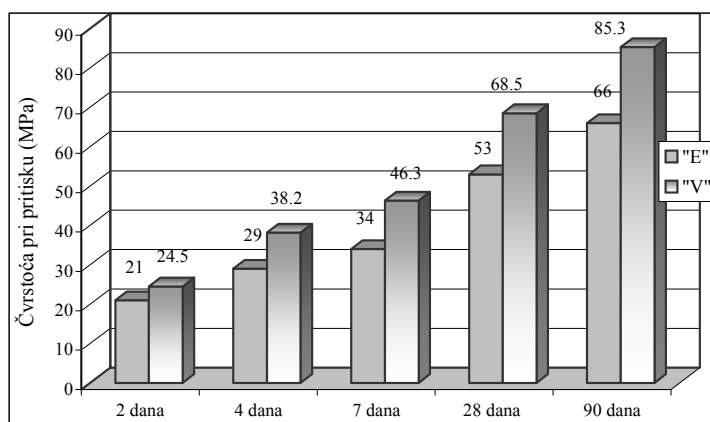
Slika 8. Čvrstoće pri savijanju u funkciji vremena



Slika 9. Uporedni prikaz čvrstoća pri savijanju u obliku histograma



Slika 10. Čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena



Slika 11. Uporedni prikaz čvrstoća pri pritisku u obliku histograma

Tabela 2. Pregled fizičko-mehaničkih svojstava ispitivanih kompozita

Starost (dani)	Zapreminska masa (kg/m <sup>3</sup> )		f <sub>zs, sr</sub> (MPa)		Procenat povećanja u odnosu na etalon (%)	f <sub>p, sr</sub> (MPa)		Procenat povećanja u odnosu na etalon (%)
	serija "V"	serija "E"	serija "V"	serija "E"		serija "V"	serija "E"	
2	2290	2143	4,5	3,4	32,35	24,5	21	16,66
4	2278	2135	7,9	5,0	58,00	38,2	29	31,17
7	2265	2130	8,9	6,0	48,33	46,3	34	36,17
28	2251	2090	9,5	6,65	42,86	68,5	53	29,25
90	2244	2082	9,8	7,3	34,25	85,3	66	29,24

U okviru tabele 2 dat je detaljan pregled procenata povećanja fizičko-mehaničkih svojstava ovih kompozita.

### 3.3 Mikroarmirani malter na bazi polipropilenskih vlakana i rečnog peska kao agregata

Eksperimentalna ispitivanja o kojima je reč predviđala su spravljanje i ispitivanje svojstava pet različitih vrsta maltera na bazi dodatka polipropilenskih vlakana. Radi lakše klasifikacije, pojedini tipovi maltera označeni su rimskim brojevima (I – V), od kojih svaki broj predstavlja oznaku serije maltera. Pri tome, serija I odnosi se na malter spravljen bez dodatka polipropilenskih vlakana (etalon). Serije II, III, IV i V spravljen su sa dodatkom monofilamentnih polipropilenskih vlakana tipa "Fibrin" (engleske proizvodnje), uz varijaciju vrste i količine predmetne mikroarmature. Tako je, u okviru serije II upotrebljeno 600 g/m<sup>3</sup>, a u okviru serije III 900 g/m<sup>3</sup> vlakana tipa "Fibrin 623" (dužine 6 mm). Serija IV bila je spravljen sa dodatkom 600 g/m<sup>3</sup> vlakana "Fibrin 23" (dužine 12 mm), a serija V sa 900 g/m<sup>3</sup> istih vlakana. Pri tome su učešća cementa, vode i agregata bila konstantna kod svih tretiranih serija maltera. Takođe, nije menjan ni tip cementa, niti vrsta i granulometrijski sastav agregata (rečnog peska) [1].

Kao što je poznato, jedan od osnovnih razloga za primenu vlakana u vidu mikroarmature kod maltera i betona, svakako leži u smanjenju vremenskih deformacija skupljanja koje se na ovaj način može postići. Cilj predmetnog istraživanja bio je da se u našim uslovima potvrde (uz primenu domaćih komponentnih materijala) rezultati brojnih u svetu izvršenih ispitivanja na malterima i betonima sa dodatkom polimernih vlakana, a koja su generalno pokazala značajno smanjenje dilatacija skupljanja, kako u najranijim fazama očvršćavanja (tzv. plastično skupljanje), tako i u kasnijim etapama (tzv. hidrauličko skupljanje).

U okviru tabele 3. dati su rezultati ispitivanja skupljanja na uzorcima serija I - V počevši od 4 dana

nakon spravljanja i ugrađivanja maltera, pa sve do starosti od 90 dana. U cilju bolje preglednosti i lakše analize, rezultati predmetnog ispitivanja prikazani su i u vidu dijagrama (slika 12). Na osnovu prikazanih rezultata ispitivanja skupljanja mikroarmiranog maltera može se zaključiti:

Na uzorcima maltera spravljenih sa dodatkom polipropilenskih vlakana tipa "Fibrin" (serije II, III, IV i V) registrovane su manje ukupne dilatacije skupljanja ( $\epsilon_{sk}$ ) u odnosu na malter spravljen bez dodatka ovih vlakana (serija I - etalon). Procenatualno, ovo smanjenje iznosi 6,72 – 16,74 % (pri starosti od 90 dana).

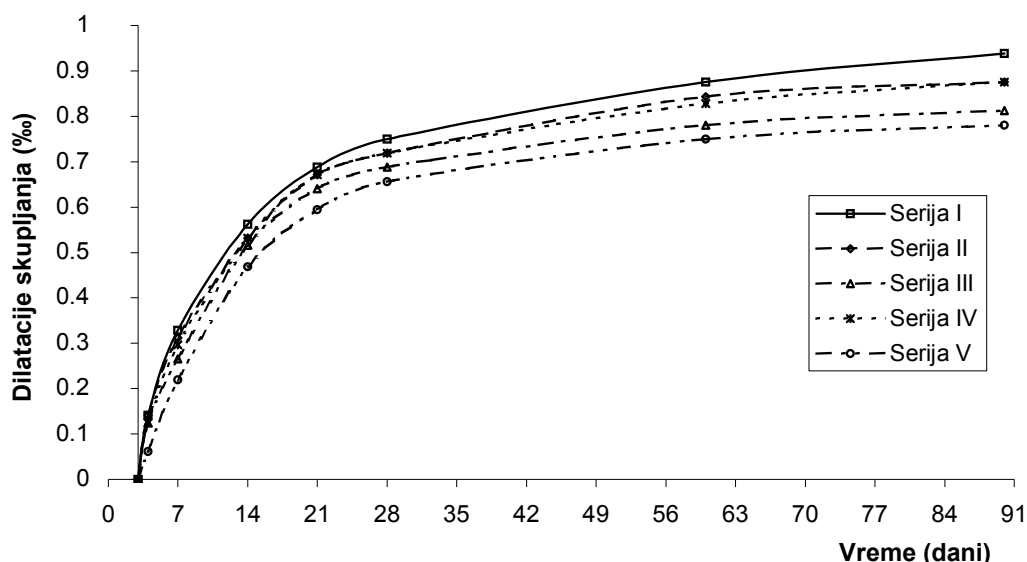
Bolji efekti, u smislu smanjenja dilatacija skupljanja, mogu se postići primenom veće količine polipropilenskih vlakana od 900g/m<sup>3</sup> (serije III i V), mada je određeno poboljšanje zabeleženo i kod uzoraka maltera spravljenih sa minimalnom količinom vlakana od 600g/m<sup>3</sup> (serije II i IV), što bi i sa ekonomskog stanovišta bilo svrsishodno.

Nešto niže vrednosti dilatacija skupljanja postižu se prilikom upotrebe dužih vlakana tipa "Fibrin 23", u odnosu na uzorke sa istom količinom vlakana manje dužine, tipa "Fibrin 623".

Što se tiče brzine priraštaja dilatacija skupljanja tokom vremena, može se uočiti da pri nižim starostima (4 i 7 dana) uzorci maltera serije II (600g/m<sup>3</sup> vlakana "Fibrin 623") ne pokazuju gotovo nikakvo smanjenje skupljanja u odnosu na uzorke serije I (etalon – bez dodatka vlakana). Uzorci serije III (900g/m<sup>3</sup> vlakana "Fibrin 623") i serije IV (600g/m<sup>3</sup> vlakana "Fibrin 23") pri istim starostima pokazali su nešto bolje performanse u odnosu na etalonske uzorke, ali je ovaj efekat izražen tek u kasnijim fazama očvršćavanja. Uzorci serije V (900g/m<sup>3</sup> vlakana "Fibrin 23") pokazali su značajno smanjenje dilatacija skupljanja u odnosu na etalon već u najranijim fazama ispitivanja (na 4 i 7 dana), pri čemu je ovakav trend ostao isti i u kasnijim etapama sve do kraja ispitivanja (90 dana).

Tabela 3. Rezultati ispitivanja skupljanja

Serija	$\epsilon_{sk}(t)$ [%]						
	t = 4 dana	t = 7 dana	t = 14 dana	t = 21 dan	t = 28 dana	t = 60 dana	t = 90 dana
I	0,141	0,328	0,562	0,688	0,750	0,875	0,938
II	0,141	0,312	0,531	0,672	0,719	0,844	0,875
III	0,125	0,266	0,516	0,641	0,688	0,781	0,812
IV	0,125	0,297	0,531	0,672	0,719	0,828	0,875
V	0,062	0,219	0,469	0,594	0,656	0,750	0,781



Slika 12. Dijagram skupljanja uzoraka maltera u toku vremena

### 3.4 Mikroarmirani malter na bazi polipropilenskih vlakana i reciklirane opeke kao agregata

U okviru sprovedenih ispitivanja tretirano je ukupno šest različitih malterskih mešavina koje su označene simbolima A, B, C, D, E i F. Svih šest mešavina spravljeno je sa  $400 \text{ kg/m}^3$  cementa. Korišćen je portland cement sa dodatkom pucolana oznake PC 15p 45S - Beočin [8].

Mešavina A - malter spravljeno na bazi opekarskog loma frakcija 0/2, 0/4 i 4/8 mm.

Mešavina B - malter spravljeno na bazi opekarskog loma frakcija 0/2, 0/4 i 4/8 mm sa dodatkom  $900 \text{ g/m}^3$  monofilamentnih polipropilenskih vlakana tipa "Fibrin".

Mešavina C - malter spravljeno na bazi opekarskog loma frakcija 0/2, 0/4 i 4/8 mm i frakcije rečnog agregata - peska krupnoće 0/4 mm.

Mešavina D - malter spravljeno na bazi opekarskog loma frakcija 0/2, 0/4 i 4/8 mm i rečnog agregata frakcije 0/4 mm sa dodatkom  $900 \text{ g/m}^3$  monofilamentnih polipropilenskih vlakana tipa "Fibrin".

Mešavina E - malter spravljeno na bazi opekarskog loma frakcija 0/2, 0/4 i 4/8 mm sa 2% superplastifikatora pod nazivom "Iriplast" (proizvođač: Iris, Skoplje, R. Makedonija).

Mešavina F - malter spravljeno na bazi opekarskog loma frakcija 0/2, 0/4 i 4/8 mm sa dodatkom vlakana (isto kao pod B) i superplastifikatora (isto kao pod E).

U okviru ekperimentalnog dela ispitivanja maltera na bazi opekarskog loma tokom vremena su praćena sledeća svojstva predmetnih kompozita: zapreminska masa (kako u svežem, tako i u očvrslom stanju), čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju i deformacije skupljanja.

Rezultati ispitivanja pokazali su da dodatak polipropilenskih vlakana utiče povoljno na poboljšanje mehaničkih svojstava predmetnih kompozita. Tako na primer, pri istoj konzistenciji maltera, povećanje čvrstoće pri pritisku iznosilo je od 5 do 16 %, a čvrstoće pri savijanju od 4 do 25 %, u odnosu na rezultate dobijene

ispitivanjem uzoraka spravljeno bez dodatka predmetnih vlakana. Ovaj procenat povećanja čvrstoće varirao je i u funkciji primenjenog agregata, tj. zavisno od toga da li je upotrebljena samo drobljena opeka ili drobljena opeka u kombinaciji sa rečnim peskom. Što se tiče vremenskih deformacija, koje su po pravilu uvek veće kod kompozita spravljeno na bazi reciklirane opeke, pokazalo se da se štetni efekti skupljanja mogu u određenoj meri redukovati upotrebom mikroarmature. Ovakav stav potvrđen je i prilikom predmetnih laboratorijskih ispitivanja, kod kojih je maksimalno smanjenje skupljanja iznosilo cca 17% [9, 16].

## 4. ZAKLJUČAK

Imajući u vidu prikazane rezultate ispitivanja, može se izvući generalni zaključak da "Spajic" čelična vlakna zakrivljena na krajevima u potpunosti ispunjavaju sve neophodne uslove za primenu u vidu mikroarmature. Ona doprinose značajnom poboljšanju pojedinih mehaničkih svojstava kompozita (pre svega čvrstoće pri smicanju, ali i čvrstoće pri savijanju), a naročito poboljšanju deformacionih svojstava (žilavosti i duktilnosti) mikroarmiranih betona i maltera. S tim u vezi, kompoziti ojačani predmetnim vlaknima mogu se koristiti u brojnim oblastima građevinarstva, a pre svega kod cementnih košuljica, industrijskih podova, prefabrikacije betonskih elemenata, otvorenih betonskih površina, temelja mašina, betonskih sefova, kao i u ostalim slučajevima kada se zahtevaju betoni povećane žilavosti i duktilnosti.

Prikazani rezultati mikroarmiranih maltera nedvosmisleno pokazuju znatno poboljšanje mehaničkih svojstava za serije izrađene sa dodatkom mikroarmature ("V"), u odnosu na etalonske serije ("E"). Dodatak čeličnih vlakana u količini od  $60 \text{ kg/m}^3$  (0,45% u odnosu na zapreminu), u kombinaciji sa aditivom tipa superplastifikatora, dao je u svim starostima veće čvrstoće kako pri savijanju, tako i pri pritisku. Pri tome, bolji efekti uočeni su kod čvrstoća pri savijanju (porast od 32-58%),



ali su takođe i čvrstoće pri pritisku bitno povećane (porast od 17-36%). Iz prethodnih rezultata uočava se takođe značajan prirast mehaničkih čvrstoća i nakon 28 dana starosti kompozita, tako da se, na primer, posle 90 dana čvrstoća pri pritisku kod serije "V" povećala čak za 25 %. Ovaj efekat može se objasniti prisustvom silikatne prašine, koja doprinosi kasnijem priraštaju čvrstoće naknadnim hemijskim reakcijama pucolanizacije.

Što se tiče mikroarmiranog maltera spravljenog sa dodatkom monofilamentnih polipropilenskih vlakana, može se izvući generalni zaključak da predmetna vlakna u izvesnoj meri doprinose smanjenju ukupnih deformacija skupljanja, a da je ovaj efekat izraženiji prilikom upotrebe kako veće količine vlakana, tako i vlakana veće dužine - tj. mikroarmature sa višim vrednostima faktora oblika (l/d). Ovakav zaključak važi kako za maltere na bazi standardnog rečnog peska, tako i za maltere spravljene sa drobljenom opekam kao agregatom.

Imajući sve napred rečeno u vidu, sledi da se malteri na bazi opekarskog loma spravljeni sa dodatkom polipropilenskih vlakana uspešno mogu primeniti kod izrade cementnih košuljica, zatim kao fasadni malteri, a takođe i kao termoizolacioni, odnosno zvukoizolacioni malteri (mikroarmatura u izvesnoj meri može da poboljša termička i akustička svojstva maltera, ali osnovni efekat njene primene u ovoj oblasti je posredan i sastoji se u povećanju duktilnosti, otpornosti na različite uticaje i uopšte trajnosti predmetnih kompozita) [14, 22]. Takođe, predmetni mikroarmirani kompoziti bi, s obzirom na svoja povoljna svojstva, mogli da nađu primenu i kao protivpožarni malteri [24, 25, 26, 27].

## 5. LITERATURA

- [1] Muravljev M., Jevtić D., Zakić D.: Uticaj dodatka polipropilenskih vlakana na neka osnovna svojstva maltera, Simpozijum INDIS 2000, Novi Sad, 2000, knjiga 2, str. 37-45.
- [2] Jevtić D., Zakić D.: Uticaj vrste i količine polipropilenskih vlakana na mehanička svojstva kompozita tipa maltera i betona, Metalurgija No 1, Vol. 8, 2002. godina, str. 39-51.
- [3] Zakić D.: Fizičko-mehanička svojstva maltera sa dodatkom polipropilenskih vlakana, magistarska teza, Građevinski fakultet, Beograd, 2001.
- [4] Muravljev M., Uljarević M.: Mikroarmirani betoni, Monografija "Specijalni betoni i malteri – svojstva, tehnologija, primena", Građevinski fakultet u Beogradu, Beograd 1999. godina, str. 97-117.
- [5] Muravljev M., Jevtić D., Zakić D.: Properties of EPS Mortar with Addition of Polypropylene Fibers, 2<sup>nd</sup> International Conference of the Chemical Societies of the South-Eastern European Countries, Halkidiki, Greece, 2000.
- [6] Westphal B., Zakić D., Scheel H., Hillemeier B.: Die Leistungssteigerung von Beton durch Kunststoffasern, Beton-Seminar "Faserbetone - Entwicklungsstand und Anwendungen", Technische Universitaet Berlin, 10. Oktober 2001.
- [7] Muravljev M., Živković S., Jevtić D., Zakić D. : Uticaj dodatka polipropilenskih vlakana na smanjenje skupljanja i fisuraciju kompozita tipa maltera i betona, naučni rad, Materijali i konstrukcije 1-2/2002, str. 11-19.
- [8] Jevtić D., Zakić D., Harak S. : Ispitivanje različitih tipova maltera spravljenih na bazi opekarskog loma, XXII Kongres JUDIMK-a, Niška Banja 17-18. oktobar 2002. godine, str. 25-31.
- [9] Jevtić D., Zakić D., Harak S. : Ispitivanje različitih tipova maltera spravljenih na bazi opekarskog loma, Materijali i konstrukcije 3-4/2002, str. 60-64.
- [10] Muravljev M., Jevtić D., Zakić D. : Primeri primene polimernih materijala u malterima i betonima, Simpozijum o primeni plastičnih materijala u izgradnji i održavanju puteva, Institut za puteve AD Beograd, Subotica 12-14. jun 2003. godine, str. 293-304.
- [11] Jevtić D., Zakić D.: Analiza rezultata ispitivanja betona mikroarmiranog čeličnim vlaknima "Spajic", 12. Kongres JDGK, Vrnjačka Banja 29-30. septembar 2004. godine.
- [12] Muravljev M., Jevtić D.: Građevinski materijali 2, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1999.
- [13] Muravljev, M., Jevtić, D., Markičević, J.: Influence of Filler Content to the Characteristics of EPS Mortars, 4<sup>th</sup> International Conference Research and Development in Mechanical Industry RaDMI 2004, Proceedings p. 858-865, 31.08.-04.09.2004, Zlatibor.
- [14] Jevtić, D., Zakić, D., Dević, M., Markičević, J.: Application of Polystyrene-Based Concrete as a High-Performance Thermo-Insulation Composite, 5<sup>th</sup> International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI 2005, 04-07. September 2005, Vrnjačka Banja, Serbia and Montenegro, pp. 710-715.
- [15] Muravljev M.: Savremeni konstrukcijski materijali - dometi i tendencije razvoja. Materijali i konstrukcije 1-2, 1993, YU ISSN 0543-0798, str. 55-65.
- [16] Jevtić D., Zakić D., Pavlović Lj.: Testing of Different composite materials based on recycled brick aggregate. WASCON 2006, Sixth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, June 2006, Belgrade ISBN 86 - 908815-0-6, pp. 409-414.
- [17] Živković S., Jevtić D., Radonjanin V.: Istraživanja na području materijala i njihove primene. Generalni izveštaj i prikaz radova za XXIII Kongres Društva za ispitivanje materijala i konstrukcija SCG. Materijali i konstrukcije br. 4, god. 2005, str. 9-24. YU ISSN 0543-0798.
- [18] Jevtić D., Zakić D., Markičević J.: Uticaj mikroarmature na primenu fizičko-mehaničkih svojstava cementnih kompozita. Internacionalni naučno-stručni skup "Građevinarstvo - nauka i praksa", Žabljak 2006, str. 551-556.
- [19] M. Muravljev, D. Jevtić, D. Zakić: Primeri poboljšanja performansi betona i maltera putem mikroarmiranja, Godišnja konferencija "Savremeni problemi u građevinarstvu", Građevinski fakultet u Subotici, Subotica, jun 2005, str. 225-235, YU ISSN 0352-6852.
- [20] M. Muravljev, D. Jevtić, D. Zakić: Properties of cement based composite made with expanded

- polystyrene grains and polypropylene fibers, Chemical industry, vol. 54, 2000, HMIDA 8, pp. 501-504.
- [21] M. Muravljev, D. Jevtić, Zakić, D.: The Influence of Polypropylene Fibers on Mortar as a Composite Material, Euromat 2001, 7<sup>th</sup> European Conference on Advanced Materials and Processes, Rimini, Italy, 10-14 June 2001
- [22] Jevtić D., Zakić D.: Application of Simprolit Systems in Order to Improve Thermo-Physical Performance of Contemporary Buildings, RADMI 2006, Budva, septembar 2006.
- [23] Jevtić D., Zakić D.: Promena fizičko-mehaničkih svojstava maltera i betona mikroarmiranjem, 12. Kongres JDGK, Vrnjačka Banja 27-29.09.2006, str. 121-126, Knjiga 2, ISBN 86-906149-4-X, COBISS SR - ID 134191372.
- [24] Muravljev M., Pakvor A., Kovačević T.: Explorations of Concrete and Structural Concrete Elements made of Reused Masonry, 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Odense, Denmark, 1993.
- [25] Pakvor A., Muravljev M.: Damages and Rehabilitation of the Belgrade Orthodox Cathedral, IABSE Colloquium "Saving Buildings in Central and Eastern Europe", Berlin, 1998.
- [26] Hansen T.: Recycling of Demolished Concrete and Masonry, Report of Technical Committee 37 - Demolition and Reuse of Concrete, RILEM, E&FN SPON, London, UK, 1992.
- [27] Akhtaruzzaman A., Hasnat A.: Properties of Concrete using Crushed Bricks as Aggregate, Concrete International, 2/83, 1983.
- [28] Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Concrete, Soroushian, Mirza, and Alhozaimy, ACI Materials Journal, vol. 92 No. 5, september-october 1995.
- [29] Uniaxial Tensile Behavior of Concrete Reinforced with Randomly Distributed Short Fibers, Z.Li, F. Li, T.-Y.P. Chang, and Y.-W. Mai, ACI Materials Journal, vol. 95 No. 5, september-october 1998.
- [30] Engineering Material Properties of a Fiber-Reinforced Cellular Concrete, R.F. Zollo and C.D Hays, ACI Materials Journal, vol. 95 No. 5, september-october 1998.
- [31] Fatigue Performance in Flexure of Fiber Reinforced concrete, Zhang Jun and Henrik Stang, ACI Materials Journal, vol. 95 No. 1, january-february 1998.
- [32] Katalozi proizvođača vlakana - firme "Spajić", Kobišnica, SCG.
- [33] Katalozi proizvođača vlakana - firme "Fibrin", Velika Britanija.
- [34] Živković, S., Jevtić, D., Zakić, D., Savić, A.: Neki rezultati istraživanja mikroarmiranih samozbijajućih betona, XXIII Kongres JUDIMK-e "Simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u našem građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija", Novi Sad, 20.-21. oktobar 2005, str. 63-73.

## REZIME

### MIKROARMIRANI MALTERI I BETONI - MOGUĆNOST POBOLJŠANJA FIZIČKO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA

*Dragica JEVTIĆ  
Dimitrije ZAKIĆ*

U radu je dat prikaz osnovnih svojstava mikroarmiranih kompozita tipa maltera i betona. Prikazuju se rezultati sopstvenih laboratorijskih ispitivanja dobijeni na dva tipa maltera kao i na dva tipa betona. Kod nekih od ovih serija korišćena su čelična vlakna zakrivljena na krajevima.

Dalje, prikazuju se rezultati ispitivanja dobijeni na uzorcima spravljenim sa polipropilenskim vlaknima i to kao sa rečnim agregatom, tako i sa agregatom od drobljene opeke. Pri ispitivanjima praćena su sledeća svojstva: zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju kao i skupljanje.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazuju značajno poboljšanje mehaničkih svojstava kompozita izrađenih sa mikroarmaturom.

**Ključne reči:** kompozit, malter, beton, čelična vlakna, polipropilenska vlakna, mehanička čvrstoća, agregat od drobljene opeke, skupljanje.

## SUMMARY

### FIBER REINFORCEMENT MORTARS AND CONCRETES - THE POSSIBILITIES OF IMPROVEMENT PHYSICAL - MECHANICAL PROPERTIES

*Dragica JEVTIĆ  
Dimitrije ZAKIĆ*

Basic properties of fiber reinforcement mortar and concrete type composites have been represented in the paper. The results of authors' own laboratory testing of two concrete types as well as two mortar types are shown. Some of the series were made with the addition of hooked steel fibers.

Furthermore, testing conducted on mortar specimens made with ordinary sand and crushed brick aggregate are presented. Certain specimen series were made with the additional of monofilament polypropylene fibers. During the testing the following properties were considered: density, compressive and flexural strength as well as shrinkage of mortar.

The obtained experimental results pointed to the significant improvement of mechanical properties of the composites with reinforcement.

**Key words:** composite, mortar, concrete, fiber reinforcement, steel fibers, polypropylene fibers, mechanical strength, crushed brick aggregate, shrinkage