

Savez inženjera metalurgije Jugoslavije
SIMJ

UDC:669.971.015.42-036.47=861
Originalni naučni rad

UTICAJ VRSTE I KOLIČINE POLIPROPILENSKIH
VLAKANA NA MEHANIČKA SVOJSTVA KOMPOZITA
TIPA MALTERA I BETONA
THE INFLUENCE OF TYPE AND QUANTITY OF
POLYPROPYLENE FIBERS ON MECHANICAL PROPERTIES
OF MORTAR AND CONCRETE

D. JEVTIĆ, D. ZAKIĆ

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Primljeno: 01. 02. 2002.

IZVOD

Ojačanje različitih vrsta krutih materijala pomoću vlakana, u cilju poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava, predstavlja koncept koji je poznat i primenjivan od davnina. Ovaj koncept je naročito aktuelan u poslednje dve dekade, kada je razvijen i uveden u upotrebu veliki broj novih vrsta vlakana (ili tzv. mikroarmature). Od svih tipova vlakana, kao najznačajnije možemo izdvojiti sledeće: čelična (od običnog ili nerđajućeg čelika), polimerna (polipropilenska, polietilenska, najlonska i dr.), mineralna (azbestna, staklena), kao i vlakna od prirodnih materijala (od celuloze, konoplje, bambusa, kokosa, itd.). U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja svojstava maltera - kompozita spravljenih na bazi dodatka polipropilenskih vlakana. Na bazi sopstvenih istraživanja, može se izvući zaključak da dodatak relativno male količine polipropilenskih vlakana (~ 0,1% od ukupne zapremine), poboljšava pojedina mehanička svojstva kompozita tipa maltera i betona, kao što su čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju i čvrstoća pri smicanju.

Ključne reči: mehanička svojstva, malter, mikroarmiranje, mikroarmatura, mikroarmirani kompoziti, polipropilenska vlakna, eksperimentalni rezultati.

ABSTRACT

Reinforcement of different brittle materials using fibers in order to improve their mechanical properties is an age-old concept. This concept is especially actual in the last two decades, when a large number of new fiber types have been developed. Among these are fibers made of steel (ordinary or stainless), polymeric compounds (polypropylene, polyethylene, nylon, etc.), mineral materials (asbestos, glass) and naturally occurring materials (cellulose, sisal, bamboo, coconut, etc.). This paper deals with results of experimental investigations of fiber-reinforced mortar - composite material made with addition of polypropylene fibers. On the basis of own explorations, the conclusion can be derived that the addition of relatively small amount of polypropylene fibers (volume fraction ~ 0,1%) improves certain mechanical properties of mortar and concrete composites, such as compressive strength, flexural strength, and shear strength.

Key words: mechanical properties, mortar, fiber-reinforcement, fiber-reinforced composites, polypropylene fibers, experimental results.

UVOD

Savremeni trendovi u oblasti nauke o materijalima na ulasku u 21. vek neprekidno zahtevaju uvođenje novih tehnologija – u cilju osvajanja kvalitetnijih, trajnijih i ekonomičnijih materijala. Tu, pre svega, spadaju novi kompoziti sa poboljšanim fizičko-mehaničkim, reološkim, tehnološkim, eksploatacionim i drugim karakteristikama 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. 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 karakteristika pripadaju istoj kategoriji građevinskih materijala.

Mikroarmirani malteri i betoni predstavljaju kompozitne materijale dobijene ojačanjem cementne matrice pomoću ravnomerno dispergovanih vlakana. S obzirom na poznatu činjenicu da ovi građevinski materijali slabije podnose napone zatezanja, imaju malu žilavost i izraženu deformabilnost usled skupljanja i tečenja, bilo je sasvim logično viševjekovno nastojanje graditelja da pomenuta svojstva na neki način poboljšaju. Sa pozicija današnjeg stepena tehnološkog razvoja, rešenje ovog problema čini se jednostavnim: dodavanjem određene, optimalne količine vlakana organskog ili neorganskog porekla u svežu mešavinu maltera ili betona, dobićemo kompozit sa unapređenim željenim fizičko-mehaničkim svojstvima.

Savremeni razvoj maltera i betona armiranih vlaknima i datira počev od 60-tih godina 20. veka. Na početku ovog perioda korišćena su isključivo čelična vlakna dobijena sečenjem prave, glatke žice. Armiranje cementne matrice ovim vlaknima doprinelo je, pre svega, povećanju žilavosti i duktilnosti, a u nešto manjoj meri i rastu čvrstoće pri savijanju predmetnih kompozita. Tada su definisani i osnovni parametri, vezani za vlakna, koji utiču na kvalitet maltera, odnosno betona. To su količina vlakana, tj. masa (m_{vl} - izražena u kg/m^3) ili zapremina vlakana (V_{vl} - izražena u procentima u odnosu na ukupnu zapreminu sveže mešavine) i tzv. faktor oblika (l/d) koji predstavlja odnos između dužine (l) i prečnika (d) vlakana najčešće izražen u mm/mm .

Mada se i danas u oblasti građevinske tehnike čelična vlakna najviše primenjuju, sve je izraženiji razvoj i upotreba drugih vrsta prirodnih i veštačkih vlakana. Veliku grupu veštačkih materijala koji se koriste u ove svrhe čine sintetički materijali tipa polimera (kao što su: polipropilen, polietilen, najlon, poliester, polivinilalkohol, aramid, poliamid, poliakrilnitril i dr.). Prednosti ovih vlakana u odnosu na čelična ogledaju se, pre svega, u značajnom smanjenju dilatacija skupljanja, redukciji izdvajanja vode na površini betona, odnosno

maltera, lakšoj ugradljivosti i obradljivosti svežih mešavina i nižoj ceni. S druge strane, čelična vlakna imaju znatno bolje mehaničke karakteristike, a naročito modul elastičnosti, u poređenju sa većinom vrsta polimernih vlakana. Takođe, primena karbonskih vlakana doživela je naglu ekspanziju nakon pronalaska postupka dobijanja ovog materijala iz nafte, što je višestruko snizilo proizvodne troškove. Ova vlakna privukla su naročitu pažnju stručnjaka zbog svojih visokih mehaničkih karakteristika (pre svega čvrstoće i modula elastičnosti) u odnosu na većinu drugih sintetičkih vlakana.

Što se upotrebe azbestnih vlakana tiče ona je, nakon početnog buma, danas drastično smanjena. Do ovoga nije došlo zbog lošeg kvaliteta ovog materijala, već zbog njegovog štetnog delovanja na zdravlje ljudi, koje se najčešće manifestovalo u vidu pojave ozbiljne plućne bolesti nazvane azbestoza. Zbog toga je veliki broj visoko industrijalizovanih, razvijenih država sveta i zakonski sankcionisao širu upotrebu azbestnih vlakana, zajedno sa mnogim drugim azbestnim proizvodima. Odsustvo ovih vlakana izuzetno visokih mehaničkih karakteristika, koja su pre svega korišćena za mikroarmiranje tankih betonskih elemenata, kao što su ploče, platna i ljuske, još uvek nije na pravi način supstituisano.

Brojne vrste prirodnih materijala takođe se koriste, u većoj ili manjoj meri, u obliku vlakana koja se dodaju svežem malteru, odnosno betonu. Ovde, pre svega, možemo da ubrojimo drvena (celulozna) vlakna kao tehnički i komercijalno najprihvatljivija, mada se u pojedinim zemljama sveta koriste i mnogi drugi tipovi prirodno dobijene mikroarmature na bazi pamuka, slame, jute, bambusa, trske, konoplje, kokosa, itd. Najveći problem vezan za prethodno nabrojane, kao i za ostale vrste vlakana prirodnog porekla, leži u njihovoj malo trajnosti u uslovima alkalne sredine koja vlada unutar cementnog kamena. To znači da ova vlakna pre upotrebe moraju biti površinski pripremljena (tj. "umrtvljena"), što podrazumeva različite tehnološke postupke, kao što je na primer mineralizacija.

U poslednjih desetak godina, u oblasti mikroarmiranja betona i maltera sve je šira primena vlakana mineralnog porekla, od kojih su svakako najznačajnija staklena vlakna. I ovde se, kao osnovni problem, javlja njihova trajnost u uslovima alkalne sredine, ali je on uspešno rešen razvojem novih vrsta alkalno-rezistentnog stakla, kao i novih tipova aditiva za modifikovanje pH vrednosti cementne matrice.

Kao ilustracija svega što je do sada rečeno o važnijim svojstvima mikroarmature, u okviru tabele 1. dat je uporedni pregled osnovnih fizičko-mehaničkih, deformacionih i eksploatacionih karakteristika najčešće korišćenih tipova prirodnih i veštačkih vlakana [1], [2], [3].

Tabela 1 - Važnija svojstva različitih tipova vlakana

Table 1 - Important properties of different fiber types

Vrsta vlakna	Specifična masa γ_s [g/cm ³]	Čvrstoća pri zatezanju f_z [MPa]	Modul elastičnosti E [GPa]	Izduženje pri kidanju ϵ_{uk} [%]	Max. temp. T [°C]	Otpornost u alkalnoj sredini
Čelična	7,8	500-2600	200	0,5-3,5	—	otporna
Staklena (AR)	2,5-2,7	1500-3700	75	1,5-3,5	—	otporna
Azbestna	3,2-3,4	550-3500	200	0,6-3,0	—	otporna
Polipropilenska	0,9	300-750	3,5-12,0	6,0-25,0	~160	otporna
Poliesterska	1,4	800-1100	10,0-19,0	≤ 5,0	~240	neutralna
Polietilenska	0,9	20-30	0,12-0,40	300-700	~100	neutralna
Polivinil-alkohol	1,3	800-900	26,0-30,0	5,0-7,5	~240	otporna
Akrilna	1,1-1,2	600-900	15,0-20,0	6,0-9,0	~150	otporna
Najlonska	1,1-1,4	700-800	7,0-13,0	16,0-20,0	~400	neutralna
Veštačka svila	1,5	400-600	6,0-7,0	10,0-25,0	—	—
Karbonska	1,6-1,9	550-2600	30-230	1,0-2,0	3000	otporna
Celulozna	1,2-1,5	200-500	5,0-40,0	≤ 3,0	—	neotporna
Pamučna	1,5	400-700	4,0-5,0	3,0-10,0	—	neotporna

EKSPERIMENTALNI DEO

U okviru eksperimentalnih ispitivanja o kojima je ovde reč urađeno je 5 serija maltera, čiji su se sastavi razlikovali samo po količini i vrsti (dimenzijama) upotrebljenih polipropilenskih vlakana tipa Fibrin (zemlja proizvodnje: Engleska). To znači da su količine cementa, agregata (standardni trofrakcijski kvarcni pesak) i vode kod svih malterskih mešavina - serija bile konstantne i to: masa cementa $m_c=500\text{kg/m}^3$, masa agregata $m_a=1500\text{kg/m}^3$ i masa vode $m_v=250\text{kg/m}^3$. Ove serije označene su na sledeći način:

- Serija I - etalon (bez prisustva polipropilenskih vlakana);
- Serija II - sa 600 g/m^3 vlakana tipa "Fibrin 623";
- Serija III - sa 900 g/m^3 vlakana tipa "Fibrin 623";
- Serija IV - sa 600 g/m^3 vlakana tipa "Fibrin 23";
- Serija V - sa 900 g/m^3 vlakana tipa "Fibrin 23".

Što se tiče procentualnog sadržaja vlakana (po zapremini) kod etalona on iznosi: $\Delta V_{vl} = 0\%$, kod serija II i IV: $\Delta V_{vl} \approx 0,066\%$, a kod serija III i V: $\Delta V_{vl} \approx 0,1\%$. Najvažnija svojstva primenjenih polipropilenskih vlakana prikazana su u tabeli 2 [4].

Tabela 2 - Važniji tehnički podaci o polipropilenskim vlaknima "FIBRIN"

Table 2 - Important technical data concerning "Fibrin" polypropylene fibers

Sintetička vlakna	FIBRIN 23	FIBRIN 623
Osnovni materijal	Polipropilen (100 %)	
Način proizvodnje	Istezanjem i vučenjem	
Tip vlakana	Monofilamentna, talasasta vlakna	
Poprečni presek	Kružni	
Prečnik	0,018 mm	
Dužina	12 mm	6 mm
Faktor oblika (l/d)	667	333
Broj vlakana / kg	~ 300 miliona	~ 600 miliona
Specifična površina	~ 230 m ² /kg	
Čvrstoća pri zatezanju	560 MPa	
Modul elastičnosti	4200 MPa	
Tačka razmekšavanja	160 °C	
Preporučeno doziranje	600 – 900 g/m ³	

Što se tiče mehaničkih karakteristika, polipropilen je materijal sa visokom čvrstoćom na zatezanje koja je približno jednaka njegovoj čvrstoći pri pritisku. Ima visoku konstrukcionu povoljnost, tj. odnos između čvrstoće materijala i njegove zapreminske mase. Ovaj koeficijent (K_{kp}) kod polipropilena iznosi preko 200, što je daleko više od čelika ili betona. Što se tiče deformacionih svojstava, predmetni polimer ima izraženu duktilnost (izduženje pri lomu iznosi 6-25 %), ali uz dosta nizak modul elastičnosti (svega 4-12 GPa). S druge strane, Poasonov koeficijent je srazmerno veliki, na šta treba obratiti pažnju u slučajevima kada su nam bitne vrednosti poprečnih deformacija. Na slici 1. prikazana je mikroskopom uvećana fotografija polipropilenskog filma snimljena nakon ispitivanja čvrstoće pri zatezanju, koja dokazuje izraženu duktilnost i deformabilnost ovog materijala [5].



Slika 1 - Polipropilenski film nakon ispitivanja čvrstoće pri zatezanju
Figure 1 - Polypropylene tape after testing of tensile strength

Što se tiče mehaničkih svojstava maltera, svakako su najznačajnije njegova čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri savijanju. Ove dve karakteristike ispitivane su na standardnim prizmatičnim uzorcima dimenzija $4 \times 4 \times 16$ cm. U okviru eksperimentalnih istraživanja [6] prikazanih u ovom radu, osim čvrstoća pri pritisku i savijanju od mehaničkih svojstava ispitivana je još i čvrstoća pri smicanju.

Uzorci maltera su spravljani mašinskim putem u laboratorijskoj mešalici tipa RILEM-CEM po standardnom postupku, s tim što je vreme mešanja produženo radi boljeg dispergovanja vlakana u masi svežeg kompozita. Što se tiče nege, prvih 24 časa uzorci su čuvani u kalupima i u vlažnom prostoru (relativne vlažnost oko 95%), a zatim do dana ispitivanja u vodi, na sobnoj temperaturi.

REZULTATI I DISKUSIJA

Čvrstoća pri pritisku

Kao što je već rečeno, uobičajeno je da se osnovne mehaničke karakteristike maltera (čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri savijanju) određuju na 3 prizmatična uzorka dimenzija $4 \times 4 \times 16$ cm. Vrednost čvrstoće pri pritisku (f_p) sračunava se na osnovu poznatog obrasca:

$$f_p = \frac{P_{gr}}{A_0} \quad (1)$$

pri čemu je: P_{gr} - sila loma (granična sila pritiska),

A_0 - površina poprečnog preseka ($4 \times 4 = 16$ cm²).

Na osnovu ovih ispitivanja definiše se klasa (marka) maltera, kao srednja vrednost (aritmetička sredina) čvrstoće pri pritisku dobijena na uzorcima starosti 28 dana. Pri standardnim ispitivanjima kvaliteta maltera, dakle, merodavna je samo f_p , dok se čvrstoća pri savijanju može registrovati, ali ne predstavlja uslov kvaliteta.

U okviru tabele 3. dati su rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku (f_p) na uzorcima maltera serija I, II, III, IV i V u starosti od 3, 7, 28 i 90 dana. Kao što se može videti, dodatak polipropilenskih vlakana u određenoj meri doprinosi povećanju čvrstoće maltera pri pritisku, pri čemu je ovaj efekat izraženiji pri ispitivanju uzoraka manje starosti (nakon 3, odnosno 7 dana). Ovaj brži priraštaj čvrstoće u ranim etapama očvršćavanja kompozita može se prikazati i procentualno, u odnosu na čvrstoće etalonskih uzoraka pri istim starostima. Ove vrednosti u tabeli 3 su označene kao Δf_p [%]. Uporedni prikaz dijagrama priraštaja čvrstoće u toku vremena za svih pet ispitivanih serija maltera dat je na slici 2.

Tabela 3 - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku (f_p) tokom vremena

Table 3 - Results of compressive strength (f_p) testing depending on time

Serija		Starost [dani]			
		3	7	28	90
I	$f_{p,e}$ [MPa]	34,14	42,97	53,39	54,70
	f_p [MPa]	37,27	43,20	55,42	57,20
II	Δf_p [%]	9,17	0,53	3,80	4,57
	f_p [MPa]	41,33	47,03	56,46	58,30
III	Δf_p [%]	21,06	9,45	5,75	6,58
	f_p [MPa]	41,09	47,97	56,15	57,60
IV	Δf_p [%]	20,36	11,64	5,17	5,30
	f_p [MPa]	41,70	48,44	57,03	58,90
V	Δf_p [%]	22,14	12,73	6,82	7,68

$$\Delta f_p(t) = \frac{f_p(t) - f_{p,e}(t)}{f_{p,e}(t)}$$

x 100 [%]

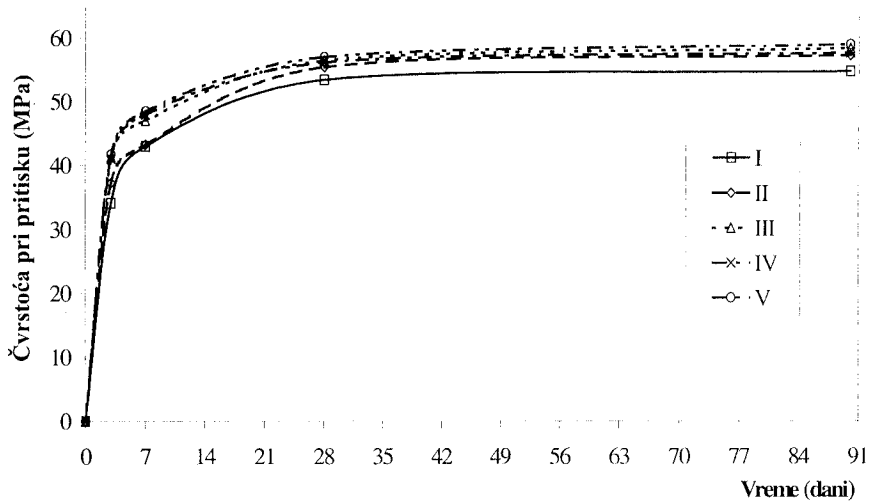
gde je:

Δf_p - procentualna razlika čvrstoća

$f_{p,e}$ - čvrstoća pri pritisku etalona

f_p - čvrstoća pri pritisku uzorka

Kao što se iz dobijenih rezultata može zaključiti, malteri sa većom količinom vlakana (serije III i V) imaju najbrži priraštaj čvrstoća pri ranim starostima (3 i 7 dana) i najveće konačne vrednosti čvrstoće pri pritisku (nakon 90 dana). Takođe, može se reći da duža vlakna tipa "FIBRIN 23" (l=12 mm), daju nešto povoljnije efekte u smislu povećanja f_p u odnosu na vlakna "FIBRIN 623" (l=6 mm), ali ova razlika nije značajnije izražena.



Slika 2 - Dijagram promene čvrstoće pri pritisku u toku vremena
 Figure 2 - Compressive strength versus time chart

Čvrstoća pri savijanju

Kao čvrstoća pri pritisku, i čvrstoća pri savijanju ispitivana je na prizmatičnim uzorcima dimenzija 4×4×16 cm. Konačne vrednosti dobijene su kao aritmetička sredina rezultata ispitivanja na 3 uzorka, uz korišćenje poznatog obrasca za sračunavanje čvrstoće pri savijanju u slučaju delovanja sile u sredini raspona:

$$f_{zs} = \frac{M}{W} = \frac{3 P_{gr} \cdot l}{2 a^3} \quad (2)$$

pri čemu je: f_{zs} – čvrstoća pri savijanju, M – moment savijanja, W – otporni moment preseka, P_{gr} – sila loma, l – raspon oslonaca, a – dužina stranice kvadrata (poprečnog preseka uzorka).

Predmetno ispitivanje vršeno je na standardnoj presi koja se koristi za određivanje čvrstoća malterskih prizmi, pri čemu je raspon oslonaca iznosio $l = 10,67$ cm. Nakon ispitivanja uzoraka na savijanje, po dve "polutke" su testirane na pritisak (dobijeni rezultati čvrstoća pri pritisku prikazani su u tabeli 4.). Iako čvrstoća pri savijanju po važećim domaćim standardima ne predstavlja uslov kvaliteta maltera, ona je izuzetno bitna mehanička karakteristika ovih kompozita. Takođe, s obzirom da su polipropilenska vlakna svojevrsna mikroarmatura, ispitivanje čvrstoće pri savijanju maltera sa dodatkom ovih vlakana i komparacija dobijenih rezultata sa karakteristikama etalona (maltera bez dodatka vlakana), predstavlja jedan od najboljih načina da se oceni njihova efikasnost.

U okviru tabele 4. dati su rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju na svih 5 serija tretiranih maltera u starosti od 3, 7, 28 i 90 dana. Takođe, sračunate su i procentualne razlike koje pokazuju porast čvrstoće pri savijanju (Δf_{zs}) u odnosu na uzorke maltera-etazona spravljenoq bez dodatka polipropilenskih vlakana (serija I).

Tabela 4 - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju (f_{zs}) tokom vremena

Table 4 - Results of flexural strength (f_{zs}) testing depending on time

Serija		Starost (dani)			
		3	7	28	90
I	f_{zs} [MPa]	7,25	7,69	8,29	8,45
II	f_{zs} [MPa]	7,38	8,31	9,21	9,43
	Δf_{zs} [%]	1,79	8,06	11,10	11,60
III	f_{zs} [MPa]	7,62	8,44	10,33	10,65
	Δf_{zs} [%]	5,10	9,75	24,61	26,04
IV	f_{zs} [MPa]	7,56	8,12	9,83	10,17
	Δf_{zs} [%]	4,28	5,59	18,58	20,36
V	f_{zs} [MPa]	8,25	8,56	10,50	10,95
	Δf_{zs} [%]	13,79	11,31	26,66	29,59

$$\Delta f_{zs}(t) = \frac{f_{zs}(t) - f_{zs,e}(t)}{f_{zs,e}(t)}$$

x 100 [%]

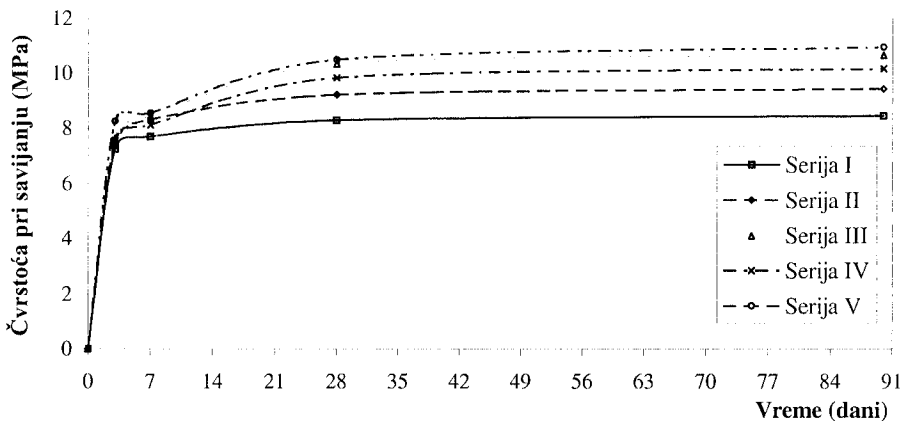
gde je:

Δf_{zs} – % razlika čvrstoća

f_{zs} – čvrstoća pri savijanju uzorka

$f_{zs,e}$ – čvrstoća pri savijanju etazona

Za razliku od ispitivanja čvrstoće pri pritisku, ovde se vidi da je manje izražen priraštaj čvrstoće pri ranim starostima (na 3 i 7 dana), ali su konačne vrednosti čvrstoće pri savijanju (nakon 90 dana) zabeležile maksimalno povećanje u odnosu na etalon. Ovakav trend još je bolje uočljiv ukoliko se posmatra dijagram rasta čvrstoće pri savijanju predmetnih maltera (serije I – V) u toku vremena (slika3.).



Slika 3 - Dijagram promene čvrstoće pri savijanju u toku vremena

Figure 3 - Flexural strength versus time chart

Što se tiče vrste i količine vlakana, može se izvući generalni zaključak da veća količina vlakana daje veće čvrstoće pri savijanju (za 11,6 – 29,6 % pri starosti od 90 dana), dok je uticaj vrste vlakana (tip "23" ili "623") na ovu mehaničku karakteristiku znatno manji. Ipak, treba reći da su nešto bolji rezultati, kao uostalom i kod ispitivanja čvrstoće pri pritisku, postignuti u slučaju primene polipropilenskih vlakana veće dužine (tip "FIBRIN 23").

Čvrstoća pri smicanju

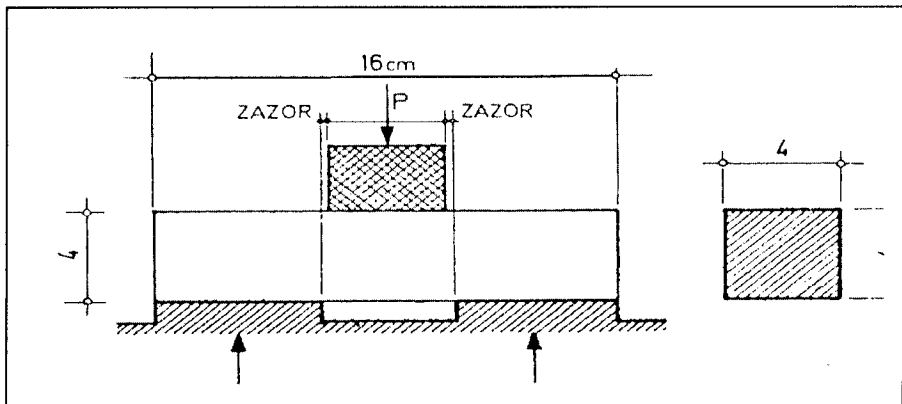
Značaj ispitivanja čvrstoće pri smicanju kod maltera nije toliko veliki, kao u slučaju čvrstoće pri pritisku ili pri savijanju. Pa ipak, i ovaj eksperiment može da nam posluži kao vrlo koristan prilog u ocenjivanju generalnog doprinosa koji dodatak polipropilenskih vlakana može da ima na poboljšanje mehaničkih svojstava maltera. Kao i u prethodnim slučajevima, čvrstoća pri smicanju ispitivana je na uzorcima maltera prizmatičnog oblika dimenzija 4×4×16 cm, prema dispoziciji prikazanoj na slici 4.

Ispitivanje je vršeno pri starosti od 90 dana, na uzorcima koji su do tog vremena bili korišćeni za praćenje deformacija skupljanja. Za izračunavanje ove mehaničke karakteristike maltera upotrebljen je poznati obrazac:

$$f_{\tau} = \frac{P_{gr}}{2A_{\tau}} \quad (3)$$

gde je: f_{τ} – čvrstoća maltera pri smicanju, P_{gr} – sila loma, a $2A_{\tau}$ – ukupna površina smicanja.

Dobijeni rezultati eksperimentalnih ispitivanja čvrstoće pri smicanju prikazani su u tabeli 5. Kao i u okviru ostalih ispitivanja, sračunate su i procentualne razlike koje pokazuju porast čvrstoće pri smicanju (Δf_{τ}), u odnosu na uzorke maltera-etadona spravljenog bez dodatka polipropilenskih vlakana (serija I).



Slika 4 -Ispitivanje čvrstoće pri smicanju (dispozicija)
Figure 4 -Shear strength testing (disposition)

Tabela 5 - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri smicanju (f_{ts}) (za starost od 90 dana)Table 5 - Shear strength (f_{ts}) testing results (after 90 days)

Serija	Karakteristika	
	f_{ts} (MPa)	Δf_{ts} (%)
I	9,19	—
II	9,75	6,09
III	10,22	11,21
IV	10,75	16,97
V	11,03	20,02

$$\Delta f_{ts} = \frac{f_{ts} - f_{ts,e}}{f_{ts,e}} \times 100 \quad [\%]$$

Kao što se iz prikazane tabele može videti, sa porastom količine vlakana raste i f_{ts} (u iznosu od ~ 6 – 20 %). Takođe, bolji rezultati i u ovom slučaju se postižu pri upotrebi dužih polipropilenskih vlakana tipa "FIBRIN 23".

ZAKLJUČAK

Rezultati sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja nedvosmisleno pokazuju da se primenom relativno male količine (~ 0,1% od ukupne zapremine) monofilamentnih polipropilenskih vlakana može u značajnoj meri uticati na mehanička svojstva kompozita tipa maltera i betona. Naime, ne menjanjući zapreminsku masu, uz konstantan sadržaj cementa, agregata i vode, dodatak polipropilenskih vlakana utiče na konačno (90 dana) povećanje svih tretiranih mehaničkih karakteristika kompozita:

- čvrstoće pri pritisku od oko 8% u odnosu na etalon;
- čvrstoće pri savijanju od oko 30% u odnosu na etalon;
- čvrstoće pri smicanju od oko 20% u odnosu na etalon.

Pri tome, najbolji rezultati prilikom ispitivanja svih mehaničkih svojstava, postignuti su na uzorcima maltera serije V (sa 900 g/m³ vlakana tipa "Fibrin 23"). To znači da veća količina vlakana sa većim faktorom oblika l/d (667) i većom dužinom l (12 mm) daje optimalne rezultate. Takodje, može se izvući zaključak da predmetna vlakna doprinose i povećanju brzine priraštaja čvrstoće tokom vremena, tj. da daju svojevrsan doprinos čvrstoći cementne matrice kod mladih kompozita u početnim fazama očvršćavanja. Tako na primer, rezultati ispitivanja već nakon 3 dana pokazuju povećanje čvrstoće pri pritisku od 9,17% - serija II, do čak 22,14% - kod serije V. Ovo se može objasniti činjenicom da u početnoj fazi očvršćavanja cementna matrica nema dovoljnu čvrstoću, tako da i sasvim mala količina polipropilenskih vlakana (0,1%) u velikoj meri doprinosi poboljšanju ove mehaničke karakteristike. Pri većim starostima (nakon 7, 28 i 90 dana), cementna matrica ima znatno viši stepen hidratacije i srazmerno veću

čvrstoću, pa je i doprinos vlakana priraštaju čvrstoće kompozita u velikoj meri smanjen.

Konačno, na bazi predmetnih istraživanja može se izvući zaključak da svakako treba dati prednost primeni dužih vlakana sa većim faktorom oblika l/d . Konkretno, to znači da se serija V (sa 900 g/m^3 vlakana tipa "Fibrin 23") može usvojiti kao optimalna, mada i serija IV (sa 600 g/m^3 vlakana tipa "Fibrin 23") zadovoljava kako u tehničkom, tako i u ekonomskom pogledu.

LITERATURA

1. M. Muravljev, M. Uljarević, Mikroarmirani betoni, Monografija "Specijalni betoni i malteri – svojstva, tehnologija, primena", Građevinski fakultet u Beogradu, Beograd 1999. godina, str. 97-117.
2. M. Lohmann, Kunststoffaserbeton – Eigenschaften des Frischbetons und des erhaerteten Betons, Universitaet – Gesamthochschule Essen, Deutschland, 1997.
3. P.N. Balaguru, S.P. Shah, Fiber Reinforced Cement Composites, Mc Graw-Hill, New York, 1992.
4. Prospekti proizvođača vlakana – firme "FIBRIN", Adfil – UK, Beverly, England.
5. S. Ohno, D.J. Hannant, Stress-Strain Response of Fiber Reinforced Composites, ACI Materials Journal, N° 91, 1994, str. 306.
6. D. Zakić, Fizičko-mehanička svojstva maltera sa dodatkom polipropilenskih vlakana, Magistarska teza, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2001.
7. M. Muravljev, D. Jevtić, Građevinski materijali 2, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1999.
8. Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Interscience Publishers – a Division of John Wiley and Sons, New York, 1969, Vol. 11, str. 597-619.
9. M. Muravljev, D. Jevtić, D. Zakić, Uticaj dodatka polipropilenskih vlakana na neka osnovna svojstva maltera, Simpozijum INDIS 2000, Novi Sad, 2000, knjiga 2, str. 37-45.
10. M. Muravljev, D. Jevtić, D. Zakić, Properties of EPS Mortar with Addition of Polypropylene Fibers, 2nd International Conference of the Chemical Societies of the South-Eastern European Countries, Halkidiki, Greece, 2000.
11. P. Soroushian, A. Khan, J.W. Hsu, Mechanical Properties of Concrete Materials Reinforced with Polypropylene or Polyethylene Fibers, ACI Materials Journal, N° 89, 1992, str. 535.
12. G.L. Vondran, M. Nagabhusharam, R. Zellers, Performance Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, Fiber Reinforced Cement and Concretes: Recent Developments, Elsevier, New York, 1989, str. 533-543.