

Prof. dr. VINKO ROGIĆ, dipl. inž. kem. <sup>1)</sup>  
Mr. sc. KREŠIMIR ŠARAVANJA, dipl. inž. građ. <sup>2)</sup>  
DANIEL DASOVIĆ, arh. građ. tehn. <sup>2)</sup>

## **Tehnologija dobivanja i istraživanje betona visokih marki sa amorfnom mikrosilikom i superplastifikatorima (beton sa mikrosilikom – BMS)**

---

### **Technology of the production and the research concrete of high strength with amorfic microsilica an superplasticizer**

#### **1. UVOD**

Posljednjih 10-15 godina betonima se redovito dodaju plasifikatori ili superplastifikatori. Ti materijali su zaokupili pažnju tehnologa betona zbog svojstva da čine smjesu za beton tekućom i smanjuju potrebu vode, pa je njihovo korištenje u betonima velike čvrstoće postalo uobičajeno.

SiO<sub>2</sub> prašina, amorfnu mikrosilika (u daljnjem tekstu: mikrosilika), kao dodatak betonima intenzivno se istražuje posljednjih nekoliko godina kao što su se superplastifikatori istraživali prije 6-7 godina. Istovremeno djelovanje mikrosilike i superplastifikatora u betonima omogućava da se dobiju betoni vrlo visokih marki u odnosu na klasični beton (tabela 1).

U ovom radu dati su preliminarni rezultati istraživanja betona sa drobljenim eruptivnim agregatom (gabro iz Jablanice), portland cementom (bez dodatka) TC Kakanj (PC 45), mikrosilikom (SF) iz tvornice silicija i ferosilicija RO "Elektrobosna" (Jajce) i superplastifikatora 600 – "Chromos", Zagreb.

U prvom dijelu rada prikazan je literaturni osvrt na mortove i betone sa mikrosilikom i superplastifikatorom, svojstva tih mortova i betona i dosadašnja njihova primjena u svijetu.

U drugom dijelu rada prikazani su rezultati dosadašnjih istraživanja sa diskusijom. U zaključnim razmatranjima navedene su moguće primjene betona visokih marki sa mikrosilikom i superplastifikatorom (BMS – "beton sa mikrosilikom").

#### **2. LITERATURNI PREGLED O MORTOVIMA I BETONIMA SA MIKROSILIKOM I SUPERPLASTIFIKATORIMA**

##### **2.1. - Superplastifikatori**

U većini zemalja proizvode se, uglavnom, dvije klase superplastifikatora:

a) **sulfornirani naftlen – formaldehidni kondenzati**, koji su prvi upotrijebljeni kao dodatak betonu šezdesetih godina. Prvo su proizvedeni u Japanu, ("Mighty 150"), a kasnije u SAD ("Lomar D" i "Sikament").

<sup>1)</sup> Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

<sup>2)</sup> "IGH-MOSTAR" d.o.o. Mostar

Obično su korišteni kao 42%-tna vodena otopina gustoće  $1200 \text{ kg/m}^3$ ;

**b) melaminsko-formaldehidni kondenzati**, razvijeni u Njemačkoj istovremeno kad i "Mighty 150" u Japanu, pod nazivom "Melment L 10". Obično su korišteni kao 20%-tna vodena otopina gustoće  $1100 \text{ kg/m}^3$ .

Pored navedenih, proizvedeni su superplastifikatori na bazi **ligno-sulfonata**. ("Mulcoplast", Kanada).

Sva tri tipa superplastifikatora su organski sulfonati tipa  $\text{RSO}_3$ , gdje je R – kompleksna organska grupa veće molekulske mase (Sl. 1)<sup>2</sup>.

Superplastifikatori djeluju kao aktivna tvar koja se apsorbira na površini zrna cementa dajući im negativan naboj (zeta potencijal 30 mV), što uzrokuje međusobno odbijanje, a time znatno smanjuje flokulaciju, odnosno povećava disperziju. Ako se dodaju normalne doze superplastifikatora, ne utječe se na vezivanje cementa.

Kada se koristi u većoj dozaži, superplastifikator na bazi naftalena može uzrokovati neznatno usporenje vezivanja. Superplastifikatori smanjuju količinu zahvaćenog zraka tokom mješanja, ali se mogu koristiti kada se rade betoni sa uvučenim zrakom pod uvjetom da je zrak uvučen prije nego je dodan superplastifikator.

Prva primjena superplastifikatora bila je za proizvodnju betona tekuće konzistencije, za betoniranje teško pristupačnih mjesta sa vrlo gustom armaturom.

Ako se koristi pretjerano velika dozaža superplastifikatora može doći do segregacije, koja može biti jače izražena nego kod normalnog betona. Konzistencija betona sa superplastifikatorom, pored ostalih faktora umnogome ovisi od sadržaja  $\text{C}_3\text{A}$  jako adsorbira superplastifikator<sup>1</sup>, čime se nepovratno uklanja dio aditiva iz otopine, pa samo mali dio doze služi za deflokulaciju čestica.

Korištenjem plastifikatora može se smanjiti količina vode 5-10%, a korištenjem superplastifikatora to smanjenje može iznositi od 15-30% pa i više, a da se zadrži normalna obradivost betona. Smanjenjem količine vode znatno se povećavaju čvrstoće (Tabela 2).

Brzina razvoja čvrstoće je veća nego kod normalnih betona, što znači da se superplastificirani betoni mogu korisno upotrijebiti za prebaricirane betonske elemente gdje se žele brzo mjenjati kalupi ili postići rano prednapinjanje elemenata. U mnogim slučajevima, visoka čvrstoća je relativan pojam: i 40 MPa se može smatrati visokom čvrstoćom. Isto tako, lakoća punjenja kalupa nekada može biti od velikog značenja. U Tabeli 3 prikazana je uobičajena receptura za superplastificirani beton.

Superplastifikatori se mogu koristiti i sa cementima sa dodacima tako da se vodocementni faktor može smanjiti do 0,30 (omjer voda : cement + leteći pepeo), a da 28-dnevne tlačne čvrstoće idu i preko 70 MPa.

## 2.2 Mikrosilika

Pri proizvodnji silicija i ferocilicijskih legura javlja se kao nusprodukt vrlo fina prašina koja se u inozemnoj literaturi pominje pod raznim imenima: "Condensed silica fume" (CSF), "silica fume" (SF), "microsilica" itd, što bi se moglo provesti kao  $\text{SiO}_2$  – prašina, ili, s obzirom na svojstva, amorfni silicij-dioksid. Taj se materijal stvara u procesu redukcije kvarca u metalni silicij pri temperaturi od 2000 °C. U plinovima koji nastaju silicij reagira s kisikom dajući nestabilni SiO koji na temperaturi od 1100 °C s kisikom iz zraka daje vrlo fini, disperginarni i amorfni  $\text{SiO}_2$ . Specifična površina ovog vrlo finog materijala (određena BET-metodom, apsorpcijom dušika) iznosi od 11 do 40 m<sup>2</sup>/g. Kako su zrna mikrosilike po veličini 1/50 do 1/100 zrna cementa, a imaju oblik kugle prosječnog promjera 0,1 μm (oko 20% zrna veličine 0,01 – 0,05 μm, 50% veličine 0,05 – 0,1 μm, 25% veličine 0,1 – 0,2 μm i 5%  $\varnothing > 0,2$  μm), cijela je površina raspoloživa (Sl. 2) za kemijsku reakciju i popunjava praznine između zrna cementa. Ova svojstva daju prednost  $\text{SiO}_2$  prašini pred letećim pepelom koji se često koristi kao umjetni pucolan. Specifična površina letećeg pepela iznosi svega 0,2 do 0,5 m<sup>2</sup>/g (Tabela 4).

Pri proizvodnji jedne tone ferosilicija nastaje 400-600 kg  $\text{SiO}_2$  prašine<sup>4</sup> tako da se u svijetu javlja godišnje oko 1.200.000 tona ovog otpadnog materijala, koji zbog svoje prirode predstavlja opasan ekološki problem (300.000 tona – SAD, 150.000 t – SSSR, 120.000 t – Norveška, itd.). Jugoslavenska industrija silicija i legura silicija daje kao nusprodukt  $\text{SiO}_2$  za koji je na temelju ispitivanja metodom rendgenske difrakcije utvrđeno da je amorfan.

Premda u literaturi ima prilično mnogo podataka o laboratorijskim istraživanjima vezanim za korištenje  $\text{SiO}_2$  prašine kao dodatka betonu, malo je izvještaja o njezinoj primjeni u širokoj praksi.

Uz zadani v/c omjer već mala količina dodatka  $\text{SiO}_2$  prašine (10% u odnosu na cement) poboljšava stabilnost i obradljivost betona, smanjuje tendenciju odvajanja vode ("bleeding") i segregaciju. Dodavanjem veće količine  $\text{SiO}_2$  prašine mortu ili betonu, smanjuje se obradivost, ako se ne poveća v/c omjer ili ne upotrijebi superplastifikator.

Primjenom poznatih metoda za određivanje pucolanske aktivnosti dodataka cementu (Frattinij-ev test, termička analiza, topljivost  $\text{SiO}_2$ ) dokazano je da je  $\text{SiO}_2$  prašina, kad se koristi kao dodatak cementu u količini od 10% vrlo aktivan pucolan<sup>5</sup>.

Iako se  $\text{SiO}_2$  prašina upotrebljava u betonu preko 15 godina (Norveška), tek je u posljednjih pet godina postala zanimljiva ostalim zemljama i to zbog sve brojnijih istraživanja potaknutih brigom za zaštitu okoliša; istraživanja su jasno ukazala na izvanredna svojstva ovog otpadnog materijala<sup>1</sup>.

Budući da mikrosilika povećava potrebu za vodom, ako joj se doda više od 5% treba upotrijebiti plastifikator, dok je za dodatak od 15-20% (na masu cementa) poželjan superplastifikator.

Budući da se mikrosilika sastoji od vrlo finih čestica, teško se s njom rukuje; vrlo su joj male nasute zapreminske mase (oko 230 kg/m<sup>3</sup>), slaba sposobnost tečenja, a osim toga jako praši.

Firma Elkem Chemicals koristi je u obliku vodenog mulja, što je njen standardni proizvod u SAD<sup>1</sup>.

Primjenom mulja moguće je miješati plastifikatore ili superplastifikatore sa mikrosilikom u jedinstveni proizvod.

Rezultati naših istraživanja pokazuju da se mikrosilika može uspješno koristiti za izradu betona i u praškastom obliku. U Tabeli 5. prikazani su oblici amorfne mikrosilike na inozemnom tržištu<sup>1</sup>.

### 2.1.1. Običan beton sa mikrosilikom

Kada se mikrosilika koristi kao zamjena za portland cement, djelovanje joj je takvo da se tri dijela cementa mogu zamijeniti jednim dijelom mikrosilike<sup>1</sup>, a da se dobiju iste čvrstoće. Uz određenu vrijednost čvrstoće, međutim, dodatkom mikrosilike dobija se nepropusniji beton koji je otporniji na kemijsku agresiju. Razlog veće nepropusnosti je u preraspodjeli veličine pora. Pore su

znatno manje, ali je ukupna poroznost skoro ista. Zbog fine raspodjele čestica mikrosilike dobija se beton u plastičnom stanju optorniji na segregaciju i "bleeding". Svježiji betoni sa velikim sadržajem mikrosilike imaju bitno drugačije reološke karakteristike; prilično su "ljepljivi", ali dobro teku kad ih se vibrira.

Pucolanska aktivnost mikrosilike je nedvojbeno dokazana. Naime, smanjenje količine  $\text{Ca(OH)}_2$  (nastao hidratacijom alita u ranijem prirodu i belita u kasnijem periodu) utvrđeno je već poslije dva dana, (dakle pucolanska reakcija počinje već poslije dva dana, a kod pucolanskih letećih pepela od ugljena značajnija pucolanska reakcija počinje nakon 60 dana – Tabela 4).

A u odležanoj pasti srazmjerno je količini dodane mikrosilike. Ima podataka koji govore da mikrosilika počinje reagirati od samog početka hidratacije, što je teško utvrditi, jer mikrosilika ubrzava hidrataciju alita. Ovo govori u prilog činjenici da dodavanje mikrosilike ne utječe na početne čvrstoće, jer ima podataka u literaturi da mikrosilika u prava dva dana ne doprinosi razvoju čvrstoća.

## 2.2.2. Beton visokih čvrstoća sa mikrosilikom

Kada se mikrosilika upotrebljava da bi se postigle velike čvrstoće, najčešće se dodaje uz normalni sadržaj cementa, (do  $350 \text{ kg/m}^3$ ). I u ovom slučaju tri dijela cementa ekvivalentna su jednom dijelu mikrosilike.

Čvrstoća, trajnost i nepropusnost betona zavise od prisutnih velikih pora u hidratiziranom cementu i od prisutnosti mikropukotina u graničnoj zoni između cementnog kamena i agregata; znači, da je povećanje čvrstoća i trajnost betona kojima je dodana mikro-silika u uskoj vezi sa smanjenjem veličine pora hidratiziranoj cementnoj pasti i sa smanjenjem mikropukotina u graničnoj zoni između paste i agregata. Istraživanja su pokazala<sup>6</sup> da produkt hidratacije cementa s dodatkom mikrosilike ima manje pore od onog u hidratiziranom cementu kojem nije dodana mikrosilika, što utječe na povećanje čvrstoće i nepropusnost. Totalni porozitet i količina zatvorenih pora u cementnom mortu i betonu važni su faktori za njihove mehaničke karakteristike, ali ne utječu bitno na njihovu propusnost<sup>7a</sup>. Smatra se<sup>3</sup> da relativno velike (veće od 90 nm) pore u betonu bitno utječu na njegovu trajnost. U normalnom mortu i betonu na bazi čistog portland cementa ima granična zona paste i sadrži veću količinu pločastih kristala kalcij hidoksida<sup>7b</sup>. Time se objašnjava nastajanje mikropukotina u graničnoj zoni između paste i agregata, koje su posljedica naprezanja nastalih zbog promjene temperature i vlage.

Dodatkom mikrosilike smanjuje se u produktu hidratacije veličina pora i debljina graničnog sloja između paste i agregata, kao i količina  $\text{Ca(OH)}_2$  zbog pucolanske reakcije<sup>7b</sup>. Zbog manjeg broja velikih pora u produktu hidratacije, manje količine  $\text{Ca(OH)}_2$  i manjeg broja mikropukotina u graničnoj zoni, kao i boljeg prijanjanja gela uz agregat i armaturu (Sl. 3)<sup>3</sup>, imaće mortovi i betoni pripremljeni s dodatkom mikrosilike veće čvrstoće i biće trajniji od mortova i betona na bazi čistog portland cementa. Zbog ovih će svojstava ti betoni biti otporniji na sulfatnu agresiju i na druga kemijska djelovanja, kao i na procese smrzavanja i odmrzavanja<sup>7b</sup>.

Razvoj čvrstoća u mortu i betonu s dodatkom mikrosilike zavisi od kinetike hidratacije, odnosno od procesa ispunjavanja pora produktima hidratacije. Budući da je amorfni  $\text{SiO}_2$  vrlo reaktivan pucolan, pucolanska se reakcija počinje odmah nakon što se počne stvarati  $\text{Ca(OH)}_2$ . Prema podacima iz literature,<sup>6</sup> do pucolanske reakcije, a time i do poboljšanja svojstava mortova i betona, dolazi na  $20^\circ\text{C}$  u periodu od 2 do 14 dana. U slučaju betoniranja u velikim masama (na pr. pri izradi brana) oslobođena toplina hidratacije se polagano odvodi i temperatura u masi betona poraste, pa pucolanska reakcija počinje i ranije.

Čvrstoće betona zavise i od količine cementa, omjera v/c i stupnja hidratacije cementa. Poznato je da betoni na bazi čistog portland cementa s visokim sadržajem cementa (oko  $500 \text{ kg/m}^3$ ) ne postižu čvrstoće mnogo veće od  $50 \text{ MPa}$ <sup>5</sup>, zbog velike količine  $\text{Ca(OH)}_2$ , velikih pora u gelu i mikropukotina u graničnoj zoni između paste i agregata. (U istraživanjima Instituta za materijale i konstrukcije (IMK) Sarajevo rađeni su betoni sa agregatom od gabra, PC 45 u dozaži od  $400 \text{ kg/m}^3$  i uz dodatak 1,2% superplastifikatora: dobivena tlačna čvrstoća iznosila je  $50 \text{ MPa}$ <sup>8</sup>). Dodatkom mikrosilike smanjuje se količina CH i veličina pora i povećava čvrstoća granične zone između gela i agregata, a rezultat su gotovo udvostručene konačne čvrstoće. Upotrebom posebnog agregata, na primjer, granita, dijabaza ili korunda, određenog granulometrijskog

sastava, uz dodatak superplastifikatora mogu se pripremiti betonske smjese v/c + mikrosilika omjera oko 0,2 pa i niže do 0,15, pa se tada postižu čvrstoće i preko 200 MPa<sup>5</sup>. Ovakvi izvanredno niski v/c migući su zbog male veličine čestica mikrosilike koje omogućuju bolje slaganje čestica i koje popunjavaju praznine između zrna cementa, jer cement nema idealno klasificirane čestice (idealnu granulometriju) za maksimalnu gustoću (Sl. 2). Teorijski bi se mogle upotrbiti i male čestice krute tvari, no budući da su čestice mikrosilike reaktivne, one naknadno postaju dio mikrostrukture očvrslje paste i daju gustu matricu velike čvrstoće. Ovakvi sistemi u literaturi se zovu "Densified Systems containing homogeneously arranged ultrafine Particles" ili DSP ("zgusnuti sistemi koji sadrže homogeno raspoređene vrlo fine čestice"). Superplastifikator je nužna komponenta kada se koristi mikrosilika, i to naročito u većim dozažama, najčešće od 2 do 4% aktivne komponente (na masu cementa i mikrosilike). Općenito, reologija betona i mortova sa superplastifikatorom i mikrosilikom je znatno drugačija od običnih betona i mortova. Ovi betoni i malteri su vrlo kohezivni i u svježem stanju (Sl. 4)<sup>3</sup>.

Ovi betoni, iako imaju velike čvrstoće, ujedno su i vrlo kruti bez armature. Čvrstoća na savijanje je u pravilu tek približno 1/10 do 1/20 tlačne čvrstoće.  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram za ove betone u uporedbi sa klasičnim betonima prikazan je na slici 5.<sup>3</sup>.

U Tabeli 6. prikazana su mehanička svojstva nekih betona i mortova sa različitim vrstama agregata. Rezultati su dobiveni na cilindričnim uzorcima 100/200 mm. Radi uporedbe: dinamički modul elastičnosti za betone HE Salakovac je 40 000 do 47 000 MPa.

Da bi se postigla elastičnost, mogu se koristiti vlakna<sup>3,9</sup>. Budući da je cemetni kamen kod BMS velike čvrstoće, čvrstoća BMS se određuje prema tipu i količini upotrebljenog agregata (Sl. 6)<sup>1</sup>.

Ostale osobine BMS sa niskim v/c prikazane su u Tabeli 7<sup>1</sup>.

Na osobine BMS niskog v/c utječu ovi elementi:

- odsutnost krupnih kapilarnih pora,
- smanjenje sadržaja  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- nepotpuna hidratacija.

Porozitet nije eliminiran, no pore koje ostaju su vrlo fine i voda se kod normalnih okolnosti u njima neće smrznuti (ni na  $-20^\circ\text{C}$ ), pa se pretpostavlja da BMS sa vrlo niskim v/c se neće oštetiti smrzavanjem i odmrzavanjem. Izvanredno male pore ukazuju na vrlo nisku propusnost koja je ispod granice većine laboratorijskih mjerenja, a to govori da će biti i visoka kemijska otpornost na agresiju, posebno na difuziju  $\text{Cl}^-$  iona.

Smanjenje CH još više doprinosi kemijskoj postojanosti ovih betona, a zbog nepotpune hidratacije (zbog ograničenog prostora) može doći do autogenog zacjeljivanja mikronaprslina<sup>1</sup>. Prisustvo velikih nehidratiziranih zrna cementa ojačava matricu.

Vrlo dobra osobina BMS sa niskim v/c je velika otpornost na abraziju i habanje. Ispitivanje abrazije na betonima, koji su korišteni za popravak slapišta brane Kinzua kod Pittsburga u SAD, ukazuje da je ovaj beton znatno otporniji na eroziju od uobičajenog betona i betona sa vlaknima (Sl. 7)<sup>1</sup>. Receptura betona za popravak slapišta brane Kinzua prikazana je u Tabeli 8.

O skupljanju i puzanju betona pripremljenih sa dodatkom mikroslike nema u literaturi mnogo podataka. Neki autori<sup>10</sup> izvještavaju da su betoni koji su sadržavali 5, 10, 15 i 20% mikroslike u odnosu na masu cementa imali u periodu do 84 dana manje skupljanje od betona na bazi čistog cementa.

Korozija čelične armature u betonu javlja se zbog smanjenog alkaliteta cementnog kamena do kojeg dolazi zbog karbonatizacije CH djelovanjem CO<sub>2</sub> iz atmosfere.

Pasta hidratiziranog cementa sadrži oko dvadeset posto kalcij-hidroksida (CH), pa je bazicitet sredine u kojoj se nalazi čelik dovoljan da se sprječi njegova korozija. Dodatkom mikroslike betonskoj smjesi reducira se količina CH. Teorijski je dovoljno 25% mikroslike da se veže ukupni CH koji je nastao hidratacijom alita belita iz portland cementa. Smanjeni alkalitet betona predstavljao bi opasnost za koroziju armature da se dodatkom mikroslike nije smanjila količina i velična velikih pora i mikropukotina; time se smanjila i propusnost betona pa je armatura bolje zaštićena od agresije CO<sub>2</sub> iz atmosfere.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1. Komponentni materijali

##### 3.1.1. Cement

Ispitivanja su provedena sa čistim PC Tvornice cementa Kakanj, koji je namjenski proizveden za ova istraživanja. Rezultati kemijske analize cementa kao i fizičko-mehaničke osobine date su niže:

##### - Kemijska analiza cementa:

g.ž.	1,61%	SiO <sub>2</sub>	18%
n.o.	4,07%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,31%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,26%	CaO	61,24%
MgO	0,62%	SO <sub>3</sub>	2,25%
	Suma	99,34%	
	Slob. CaO	0,58%	

##### - Mineraloški sastav, izračunat po metodi Bogue-a:

C <sub>3</sub> S	50,23%
C <sub>2</sub> S	14,50%
C <sub>3</sub> A	9,52%
C <sub>4</sub> AF	12,95%
CSH <sub>2</sub>	4,9%

##### - Fizičke i mehaničke osobine cementa:

### 3.1.2. Mikrosilika

Za ova istraživanja korištena je mikrosilika iz Tvornice silicija i ferosilicija "Elektrobosna" Jajce.

Rendgenskom analizom je utvrđeno da je potpuno amorfnu, a kemijskom analizom da sadrži 96,2% SiO<sub>2</sub>.

Specifična površina određena BET-metodom (niskotemperaturna apsorpcija dušika) iznosi 19,6 m<sup>2</sup>/g<sup>12</sup>.

Zapreminska masa u nasutom stanju je 260 kg/m<sup>3</sup>, a u zbijenom 350 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.1.3. Superplastifikator

Za ova istraživanja korišten je superplastifikator "Superfluidal 600" (proizvođač "Chromos" Zagreb). Po sastavu je naftalen-formaldehidna smola, molekulske mase oko 600, otopljena u vodi (oko 45% suhe tvari; pri računanju v/c uzimana je u obzir i voda iz superplastifikatora). Pri izradi betona u okviru ovih istraživanja na kraju miješanja dodavan je superplastifikator sa 1/3 preostale potrebne vode. Količina superplastifikatora (maseno) dodavana je u odnosu na količinu cementa i mikrosilike.

### 3.1.4. Agregat (jablanički gabra)

Jablanit, vrsta intruzivne magmatske stijene gabra, zbog svojih osobitosti dobila je ovaj stručni naziv po mjestu Jablanici u čijoj se neposrednoj blizini nalazi intruzija koja obuhvata površinu od 11 km<sup>2</sup>.

Eksploatacija masiva gabra otpočela je odmah poslije prvog svjetskog rata, dok je suvremenija tehnologija eksploatacije uvedena 1947. godine.

Stijena ima karakterističnu "gabra" strukturu kod koje mineralna zrna zalaze jedna u druge, što ovoj stijeni daje izuzetnu čvrstoću i žilavost.

Homogena tekstura je uglavnom karakteristična za tamne vrste, a paralelna za vrste u kojima se makroskopski zapaža stratifikacija ili folijacija.

Glavni minerali su plagioklasi koji u mineralnom sastavu učestvuju sa preko 50% a zatim pirokseni, amfiboli i biotit<sup>11</sup>.

Sporedni minerali su klorit, honblendu, epidot, magnetit, apatit, a registriran je i pirit. U pukotinama se mogu naći kvarc, kalcit, zeolit.

Način pojavljivanja, mineralni sastav, struktura i tekstura gabra uvjetovali su izuzetno povoljne fizičko-mehaničke karakteristike koje se naročito očituju u visokim vrijednostima tlačne čvrstoće, otporu na habanje, stupnju žilavosti i dr.

Način eksploatacije i stupanj iskoristivosti pojedinih ležišta zavisi su naročito od grusificiranosti, stratifikacije, folijacije, pukotina lučenja i tektonskih pukotina.

Ove pojave su u tijesnoj vezi sa genezom jablaničkog gabra, te određenim singentskim i postgenetskim promjenama u tektonskoj evoluciji prostora.

Studija ovih pojava može unijeti više svjetlosti u mnoge hipoteze o uzorcima facijalne raznovrsnosti i anizotropnosti gabra masiva.

Ispitivanje gabra iz okoline Jablanice pokazuju slijedeće vrijednosti osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika stijene:

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| - zapreminska masa sa porama i šupljinama: | 2970 kg/m <sup>3</sup>  |
| - zapreminska masa bez pora i šupljina:    | 3021 kg/m <sup>3</sup>  |
| - koeficijent zapremine mase:              | 0,983 kg/m <sup>3</sup> |
| - koeficijent poroznosti:                  | 1,70%                   |

- tlačna čvrstoća u suhom stanju:	215,3 MPa
u vodom zasićenom stanju:	183,1 MPa
poslije ispitivanja otpornosti na mraz:	172,2 MPa
- upijanje vode:	0,27
- koeficijent habanja:	7,51 cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup> .

Za potrebe realizacije Programa oko 20 m<sup>3</sup> gabra zdrobljeno je i separirano na postrojenju RO "Ukras-kamen" u Posušju. Zdrobljeni agregat separiran je u četiri frakcije: 0/4 4/8, 8/16 i 16/31,5 mm. Oblik zrna agregata je kockast.

Tabelarni pregled granulometrijskog sastava agregata sa krivuljama prosijavanja za D<sub>max</sub>=16 i 31,5 dat aje u Sl. 8.

### 3.2. Mort

Ispitivanje nekih fizičko-mehaničkih svojstava izvršeno je na serijama morta sa slijedećim komponentama:

- čisti PC, proizvod Tvornice cementa Kakanj,
- standardni trofrakcijski pijesak,
- superplastifikator: Superfluidal 600 (2% na masu cement + mikrosilika),
- mikrosilika: 0, 5, 10, 20, 25, i 30% na masu cementa,
- voda; različite dozaže vode za približno istu konzistenciju morta.

Rezultati ispitivanja pokazuju da je vezanje najbrže (Sl. 9) kad vodocementni faktor najniži (Sl. 10) kod dozaže 20% mikrosilike, što je u skladu sa računatom optimalnom količinom mikrosilike (Sl. 11).

Tlačne čvrstoće morta ispitane su i pri različitim dozažama superplastifikatora (superfluidal 600) od 1 do 4% (Sl. 12). Optimalne vrijednosti postignute su kod dozaže od 2%.

### 3.3. Beton sa mikrosilikom i superplastifikatorom BMS

Laboratorijski BMS (spravljeni s 350 kg/m<sup>3</sup> čistog PC + 150 kg/m<sup>3</sup> mikrosilike + 2% Superfluidala 600 + jablanički gabro + voda) spravljeni sa različitim v/c faktorima, imali su i različite konzistencije (Sl. 13). Rezultati ispitivanja pokazuju da v/c faktor značajnije utječe na početni prirast čvrstoće betona, a u manjoj mjeri na čvrstoće u kasnijem periodu. Svi laboratorijski BMS ispitivani su pri starosti od jedan i više dana, a beton iz serije b (Sl. 14) i poslije 3,6 i 12 sati. Rane čvrstoće betona iz ove serije iznosile su:

- poslije 3 sata	0,65 MPa
- poslije 6 sati	3,00 MPa
- poslije 12 sati	38,10 MPa
- poslije 1 dan	61,70 MPa.

Ovaj beton imao je tlačnu čvrstoću 112,0 MPa poslije 28 dana.

Na slici 15 prikazan je dijagram tlačnih i vlačnih čvrstoća (brazilski metod) na BMS.



#### **4. INTERPRETACIJA REZULTATA ISTRAŽIVANJA**

Realizacija Istraživačkog projekta “Tehnologija dobivanja i istraživanje betona visokih marki od MB 100 do MB 250”, koja obuhvata BMS – “beton sa mikrosilikom” nije završena, što se može zaključiti i po dijagramima u kojima nedostaju neki rezultati ispitivanja pri većoj starosti betona (za vrijeme pisanja ovog rada neki uzorci betona nisu bili dovoljno “stari” za sva planirana ispitivanja), zbog čega se interpretacijom obuhvataju samo ona područja za koja postoji dovoljan fond prezentiranih i drugih rezultata ispitivanja.

##### **4.1. Cement**

Prema normama, upotrebljeni čisti PC odgovara kvalitetnoj klasi 45, sa povišenim sadržajem feritne faze i nešto nižim sadržajem alita, što je nepovoljno za dobijanje betona velikih čvrstoća sa mikrosilikom i niskim v/c faktorom.

##### **4.2. Mikrosilika**

Mikrosilika iz Jajca uobičajenog je kemijskog i mineraloškog sastava, kao i specifične površine, u uporedbi sa inozemnim industrijskim otpacima ove vrste.

##### **4.3. Superplastifikator**

“Superfluidal 600”, proizvod “Chromos”, Zagreb pokazao je da izvanredno snižava v/c faktor i u kombinaciji sa mikrosilikom daje svježiji beton drugačije reologije od standardnog, veliku ljepljivost, a dobro vibriranje. Korištenjem ovog superplastifikatora dobijen je vrlo niski v/c faktor, kakav se i u literaturi pominje (v/c=0,15!).

#### **4.4. Gabro**

Vrlo kvalitetna i specifična eruptivna stijena, čvrsta za drobljenje, sa povoljnim oblikom zrna, ima značajne raspoložive zalihe (godišnje cca 80 000 m<sup>3</sup> otpadnog lomljenog gabra, nusprodukta pri proizvodnji blokova). Granulometrijski sastav je uglavnom kontinuiran u područjima primjenjenih frakcija, bez značajnijeg deficita i suficita pojedinih zrna agregata.

#### **4.5. Mortovi**

Mortovi su ispitivani samo u cilju optimizacije sadržaja mikrosilike i Superfluidala 600.

Istraživačkim projektom predviđena su posebna istraživanja mortova sa mikrosilikom, čiji je cilj primjena mortova na sanacijskim i drugim radovima.

#### **4.6. Betoni sa mikrosilikom sa niskim v/c (BMS)**

Varijacije v/c faktora, od 0,16 do 0,30 (od zemljovlažne do vrlo tekuće konzistencije) značajno utiču na rane čvrstoće ( $\beta_t^1=63,7-15,5$  MPa). Uticaj na čvrstoće poslije 28 dana je znatno manji ( $\beta_t^{28}=104,1-89,6$  MPa); predviđa se još manji utjecaj varijacije v/c faktora na "starijim" betonima. Ova osobina BMS može se koristiti kod betoniranja elemenata sa vrlo gustom armaturom (beton sa mikrosilikom koji ima vrlo tekuću konzistenciju, postiže dvostruko veću MB od klasičnih betona!).

BMS sa niskim v/c faktorom omogućava rano skidanje skele i oplata (tlačna čvrstoća poslije 12 sati – 38 MPa, poslije 24 sata – 60 MPa!), što omogućava širok spektar njegove primjene.

Odnos tlačne i vlačne čvrstoće je u uobičajenim granicama. Taj odnos se može smanjiti korištenjem vlakna, koja se inače koriste za "fibro" betone (beton armiran vlaknima).

Izvršeni opiti rezanja (dijamantrskim reznim alatom) i poliranje pri starosti betona od samo 24 sata, pokazuju njegovu primjenjivost kao umjetnog kamena; ima finu strukturu, teksturu i boju i samo dobri poznavatelji mogu ga razlikovati od prirodnog gabra.

Kvalitativni skok u dobivanju betona vrlo visokih čvrstoća je u razjašnjenju mikrostrukture očvrstlog cementnog kamena sa mikrosilikom i niskim v/c faktorom, što je jedino moguće pratiti sa scanning elektroskim mikroskopom.

## 5. MOGUĆNOST PRIMJENE BETONA SA MIKROSILIKOM (BMS)

Dosadašnja istraživanja betona sa mikrosilikom i sa superplastifikatorima i rezultati naših istraživanja, otvaraju široki spektar mogućnosti njegove primjene i istovremeno rješavaju dio ekoloških i ekonomsko-tehničkih problema deponiranja nekih industrijskih otpadnih materijala. Povoljna svojstva komponentnih materijala, primijenjenih u našim istraživanjima, omogućavaju proizvodnja betona sa novim, znatno boljim svojstvima. Očekivati je da će ovaj beton značajno utjecati na smanjenje rokova građenja, na modernizaciju industrijskog načina građenja i na niz drugih primjena u građevinarstvu, pa i u nekim drugim oblastima tehnike.

Značajnija primjena betona sa mikrosilikom, u građevinarstvu, očekuje se za slijedeće namjene:

### 5.1. Hidrotehničke konstrukcije

Visoke tlačne i vlačne čvrstoće, izvanredna gustoća, mala vodopropusnost, velika otpornost na kavitaciju, abraziju i eroziju, stvaraju realnu pretpostavku primjene ovih betona na preljevima, slapištima, evakuacijskim organima, sifonima, tunelima, betonskim spiralama, zalivnim betonima i sl.

U sadašnjoj praksi na evakuacionim organima uz brane koriste se "specijalni betoni" otporni na kavitaciju, abraziju i habanje, zbog čega se često upotrebljavaju i polimer betoni. Ovim zahtjevima betoni sa mikrosilikom mnogo bolje udovoljavaju od standardnih betona, zbog čega je u svijetu posljednjih godina počela njihova primjena za ovakve namjene (Branja Kinzua, Pittsburg).

Tunelske obloge su u posljednje vrijeme predmet šireg razmatranja, počev od statičkog tretmana do analize da li su uopće potrebne, kojih dimenzija i kakvog obima odnosno načina izvođenja. Polazeći od nekoliko osnovnih karakteristika BMS – brzo očvršćavanje, visoka tlačna i vlačna čvrstoća, vodonepropusnost, dobra zaštita armature od korozije, laka ugradljivost – cijeni se mogućnost izrade tunelskih obloga znatno manje debljine u odnosu na standardni beton, koja bi u svakom slučaju zavisila od tehniko-tehnoloških mogućnosti izvođenja. Beton bi se praktično mogao nalijevati pri vodocementnom faktoru 0,30 i ostvariti visoke čvrstoće, dobru vodonepropusnost i "ljepljivost".

Posebno značenje primjene betona sa mikrosilikom zbog njegove reologije izražen je kod špricanog betona sa dodatkom 5 do 10% mikrosilike. Prianjanje za podlogu je dobro, ne dolazi do odvajanja špricanog materijala. Da bi se poboljšala elastičnost betona dodaju se različita vlakna, čime se i veza sa podlogom poboljšava. Ovakav špricani beton ima posebnu primjenu kod izrade podgrade u suvremenim metodima građenja tunela, kao i u drugim slučajevima zaštite stjenovitih pokosa nakon otkopavanja. Pored pomenutog, špricani beton sa mikrosilikom imao bi značajnu primjenu kod izrade obloga hidrotehničkih tunela.

### 5.2. Industrijski način građenja

Kao materijal visoke nosivosti, brzog očvršćavanja i visoke otpornosti na razaranje uslijed mraza ili agresivnih uticaja, BMS može naći široku primjenu u izgradnji objekata visokogradnje. Na ovakvim objektima BMS nudi povoljna tehnička rješenja u svim elementima izloženim visokim naprezanjima, koja za rezultat daju vitkiju i lakšu konstrukciju.

Velika početna čvrstoća i jednostavno ugrađivanje omogućavaju racionalnu primjenu ovog materijala u različitim sistemima montažnog rađenja i u izradi raznih prefabriciranih elemenata. Mogućnost ranijeg demontiranja skele i oplata značajna je kako u klasičnom, tako i u industrijskom načinu građenja. Njegova dobra svojstva omogućavaju primjenu i za izradu različitih elemenata u visokogradnji, kao što su stepenice, "izgubljena" oplata nadvrtnika, nadprozornika, stubova, zatim za betonski crijep, elemente ograde, ploče za podove i zidove, te ukrasni kamen za različite namjene.

Za nosive čelične konstrukcije beton visokih marki može naći primjenu u izradi oslonca čeličnih konstrukcija, kao i maltera za podlijevanje i zalijevanje ankera.

### 5.3. Prometnice

Fizičko-mehaničke osobine i otpornost na agresivne uticaje omogućavaju primjenu BMS za izradu betonskog kolnika na putovima i aeodromima, zaštitnih ograda na putevima (New Jersey), betonskih pragova na željeznicama i dr.

Zahvaljujući brzom očvršćavanju, primjena BMS naročito je značajna u postupcima sanacije oštećenih kolnika i objekata na prometnica.

U sklopu prometnica značajna je primjena ovog materijala i u postupku izrade mostova, propusta, osiguranja trupa i dr., naročito imajući u vidu da se svi ovakvi objekti danas masovno rade iz prefabriciranih elemenata, kod kojih je upravo naglašena prednost primjene BMS. Ovdje je važno napomenuti i primjenu u konstrukcijama od prednapetog betona, u kojima BMS omogućava ranije prednapinjanje, kvalitetno injektiranje kablova (zbog bolje prionljivosti), te skraćuje tehnološko vrijeme od injektiranja kablova do punog opterećivanja prednapetih elemenata.

#### LITERATURA

- (1) Young, F.J.: **Upotreba superplastifikatora i amorfne SiO<sub>2</sub> prašine (mikrosilike) u malterima i betonima velike čvrstoće.**  
Cement, (Zagreb 1984/85) Br. 2, 51-60.
- (2) Malhorta, V.M.: **Superplasticizers: Their effect on fresh and hardened Concrete,**  
Concrete International, 3 (5) (1981) 66-81.
- (3) Bashe, H.H.: **Densified Cement/ultra fine particle-based Materials,**  
The Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, June 10-12 Ottawa, Ontario, Canada 1981.
- (4) Popović, K., Ukrainčik, V., Đureković, A.: **SiO<sub>2</sub> prašina iz proizvodnje ferolegura kao pucolanski dodatak cementu,** Kem. ind., 34 (9) (1985) 575-581.
- (5) Matković, B., Gaćeša, TI, Rus, A.: **Čvrstoća i svojstva cementa sa dodatkom amornog SiO<sub>2</sub> i superplastifikatora,**  
XI stručni sastanak proizvođača cementa i azbest cementa, Našice (1984)
- (6) Sellevold, E.J., Bager, D.H., Klitgaard, E.I., Kundsens, T.I.: **Silica fume – Cement Pastes: Hydration and Pore Structure, 19-50 u: Condensed Silica Fume in Concrete,** urednik Gjörö, Odd E., Loland, Kjell, E.,  
Proc. Nordic Research Seminar on Condensed Silica Fume in Concrete, Trondheim 1981 Report BML 82-610, Trondheim, Norway 1982.
- (7) Malhorta, V.M.: **Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete,** Vol. I i II., V.M. Malhorta,  
Publication SP-79, American Concrete Institute, Detroit (1983)
  - (a) Feldman, R.F.: **Significance of Porosity Measurements on Blended Cement Performance,** Vol. I, 415-434
  - (b) Metha, P.K.: **Pozzolanic and Cementitious Byproducts and Mineral Admixtures for Concrete – A critical Review,** Vol. I, 1-46
- (8) Knežević, N. i Stanivuković B.: **Elaborat, Izrada betona sa agregatom od gabra za potrebe ŽTO Sarajevo** (1982).
- (9) Hjorth, L., Phil. Trans. R. (London), A310 (1983) 167; Reprint 10 (Aalborg Portland, Danska).
- (10) Garette, G.G., Malhorta, V.M.: **Silica Fume in Concrete – Preliminary Investigation,** CAMMET Report 82-IE, (1982) 1-15.
- (11) Ivanković, T.: **Privatno saopćenje**
- (12) Škundrić, B., Tehnološki fakultet Banja Luka: **Privatno saopćenje.**

#### REZIME:

U prvom dijelu ovog rada prikazan je osvrt na literaturne podatke o korištenju silica fume (SiO<sub>2</sub> prašina) ili mikrosilike u betonima visokih čvrstoća. Istovremenim korištenjem mikrosilike, superplastifikatora i kvalitetnih agregata mogu se dobiti betoni čvrstoće i preko 200 MPa; korištenjem ova dva dodatka može se smanjiti v/c faktor do 0,15, što značajno smanjuje poroznost betona, a tim povećava vodonepropusnost, otpornost na mraz, agresivne utjecaje itd. Niskim v/c faktorom postižu se visoke rane čvrstoće, što je dokazano i našim istraživanjima, prikazanim u

eksperimentalnom dijelu ovog rada (nakon 12 sati  $\beta_t=38$  MPa, nakon 24 sata 60 MPa), što pruža veliku mogućnost primjene ovih betona za interventne radove u građevinarstvu, brzo skidanje oplata i općenito u proizvodnji elemenata bez zaparivanja. Betoni sa mikrosilikom i superplastifikatorom i kod v/c faktora 0,30 imaju jako tekuću konzistenciju, pa su pogodni za niz radova u građevinarstvu – zalivni betoni i sl. U posljednjem dijelu ovog rada prikazane su prognozistički detaljnije izvanredne mogućnosti primjene betona sa mikrosilikom (BMS) u različitim područjima u građevinarstvu – od hidrotehničkih objekata do betonske galanterije.