

Primljen / Received: 12.3.2014.

Ispravljen / Corrected: 13.6.2014.

Prihvaćen / Accepted: 7.7.2014.

Dostupno online / Available online: 1.8.2014.

# Beton visokih uporabnih svojstava sa čeličanskom zgurom kao agregatom

## Autori:



Doc.dr.sc. **Verapathran Maruthachalam**,  
dipl.ing.stroj.  
CMS sveučilište inženjerstva i tehnologije  
Odjel za građevinarstvo  
Coimbatore, India  
[mveerapathran@yahoo.com](mailto:mveerapathran@yahoo.com)



Prof.dr.sc. **Murthi Palanisamy**, dipl.ing.građ.  
Vivekananda sveučilište inženjerstva  
Odjel za građevinarstvo  
Tiruchengode, India  
[drpmurthi@gmail.com](mailto:drpmurthi@gmail.com)

Izvorni znanstveni rad

[Verapathran Maruthachalam, Murthi Palanisamy](#)

## Beton visokih uporabnih svojstava sa čeličanskom zgurom kao agregatom

U radu se analizira utjecaj starenja čeličanske zgre kao agregata na mehanička svojstva betona visokih uporabnih svojstava. Razmatra se utjecaj raznih vremena starenja na mehanička svojstva betona. Uočeno je da proces starenja zgre utječe na svojstva ovog betona. Tlačna čvrstoća betona raste usporedo s porastom vremena starenja. Savojna čvrstoća, Youngov modul i udarna čvrstoća rastu slično kao i tlačna čvrstoća. Obradivost betona i gubitak abrazijom smanjuju se s povećanjem vremena starenja.

### Ključne riječi:

beton visokih uporabnih svojstava, čeličanska zgura, abrazija, vrijeme starenja, udarna čvrstoća, mehanička svojstva

Original scientific paper

[Verapathran Maruthachalam, Murthi Palanisamy](#)

## High performance concrete with steel slag aggregate

The effect of the steel slag aggregate aging on mechanical properties of the high performance concrete is analysed in the paper. The effect of different aging periods of steel slag aggregate on mechanical properties of high performance concrete is studied. It was observed that properties of this concrete are affected by the steel slag aggregate aging process. The compressive strength increases with an increase in the aging period of steel slag aggregate. The flexural strength, Young's modulus, and impact strength of concrete, increase at the rate similar to that of the compressive strength. The workability and the abrasion loss of concrete decrease with an increase of the steel slag aggregate aging period.

### Key words:

high performance concrete, steel slag aggregate, abrasion, aging period, impact strength, mechanical properties

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

[Verapathran Maruthachalam, Murthi Palanisamy](#)

## Hochleistungsbeton mit Stahlschlacke als Zuschlagstoff

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Reifung von Stahlschlacke als Zuschlagstoff auf mechanische Eigenschaften von Hochleistungsbeton analysiert. Dabei ist der entsprechende Einfluss verschiedener Reifungszeiten der Stahlschlacke untersucht. Der Reifungsprozess hat sich als bedeutend für die Eigenschaften des Hochleistungsbetons herausgestellt. Die Druckfestigkeit steigt mit anwachsender Reifungszeit. Die Biegefestigkeit, der Youngsche Modul und die Stossfestigkeit wachsen ebenfalls entsprechend an. Die Verarbeitbarkeit und der Abriebverlust des Betons werden durch längere Reifungszeiten der Stahlschlacke, die als Zuschlagstoff verwendet wird, vermindert.

### Schlüsselwörter:

Hochleistungsbeton, Stahlschlacke als Zuschlagstoff, Abrieb, Reifungszeit, Stossfestigkeit, mechanische Eigenschaften

## 1. Uvod

Beton visokih uporabnih svojstava je beton koji udovoljava posebnim svojstvima i zahtjevima postavljenim na ujednačenosti koje se ne mogu uvijek zadovoljiti primjenom postupaka i materijala koji se koriste u proizvodnji konvencionalnog cementnog betona. Glavna razlika između konvencionalnog cementnog betona i betona visokih uporabnih svojstava uglavnom se sastoji u primjeni kemijskih i mineralnih dodataka. Naime, kombiniranom upotrebom kemijskih i mineralnih dodataka dobivamo ekonomičan beton poboljšanih svojstava [1]. Količina cementa u betonu smanjuje se i s dodavanjem mineralnih primjesa, što izravno doprinosi smanjenju emisija CO<sub>2</sub> [2]. Agregati su značajan sastojak betonskog kompozita jer umanjuju skupljanje i doprinose ekonomičnijoj proizvodnji betona. Većina agregata koje danas koristimo su prirodni materijali, s tim da se betonu može dodavati i umjetni agregat. Takav umjetni obrađeni agregat reagira i kemijski se spaja s cementnom pastom, što dovodi do poboljšanja mehaničkih svojstava betona [3]. Čeličanska zgura, nusproizvod u postupku izrade čelika, nastaje tijekom odvajanja rastaljenog čelika od nečistoća u pećima u kojima se čelik proizvodi. Taj se nusproizvod drobilicom usitnjava kako bi se mogao upotrijebiti kao agregat u proizvodnji asfalta i betona. Netinger i dr. smatraju da se čeličanska zgura može koristiti kao agregat u betonu. Takva bi primjena doprinijela prihvatljivom korištenju te vrste otpada, a ujedno bi se manje koristio agregat koji se inače uzima iz prirodnih nalazišta [4]. Netinger i dr. navode da se čeličanska zgura može koristiti kao agregat u betonu namijenjenom za ugradnju u armiranobetonske konstrukcije [5]. Maslehuddin i dr. izvještavaju da su fizikalna i trajnosna svojstva cementnog betona s čeličanskom zgurom bolja od karakteristika betona s drobljenim vapnencom kao agregatom [6]. Akinbinu navodi da tlačna čvrstoća betonskih mješavina s čeličanskom zgurom ima veću vrijednost od betonskih mješavina sa lateritom [7]. Shih i dr. proučavali su karakteristike opeke napravljene od čeličanske zgre, te su došli do zaključka da se njenom upotrebom smanjuje potrebna temperatura miniranja [8]. Alizahelu i dr. smatraju da se čeličanska zgura može koristiti kao agregat u betonu, ali i da je korisnija u betonu visokih čvrstoća nego u betonu normalne čvrstoće [9]. Wu i dr. izvještavaju da su, pri visokim temperaturama, svojstva splitmastiks asfalta (SMA) s čeličanskom zgurom bolja od svojstava mješavina SMA s dodatkom bazalta. Bolja fizikalna svojstva čeličanske zgre dovode i do povećanja otpornosti na trajne deformacije pri visokim temperaturama [10]. Sada se u Indiji proizvodi ukupno 72,20 milijuna tona čelika, a kao otpad se godišnje generira oko 18 milijuna tona čeličanske zgre, od čega se jedva 25 posto koristi u proizvodnji cementa [11]. Za vrijeme proizvodnje čelika, u peći se dodaju i sredstva za omekšavanje kao što su vapno ili dolomit da bi se iz sirovina odstranile nečistoće (staro željezo i čelik). Te se nečistoće pri visokim temperaturama vezuju sa

sredstvima za omekšavanje pa se tako dobiva nusproizvod poznat kao čeličanska zgura, koji pluta na površini otopljenog čelika. Treba napomenuti da u čeličanskoj zguri ostaje i određena količina neizgorenog vapna ili dolomita, takozvanog slobodnog vapna. To slobodno vapno nalazimo u nevezanom i nestabilnom stanju u vapnenim džepovima. Takva zagađena čeličanska zgura uzrokuje ozbiljne probleme zbog širenja u betonu uslijed naknadne hidratacije slobodnog vapna. Treba napomenuti da primjena čeličanske zgre nakon određenog vremena (npr. nakon isteka jedne godine) umanjuje mogućnost ekspanzije slobodnog vapna, jer je u tom slučaju već dovršena hidratacija slobodnog vapna koje se nalazi u zguri [9]. Kako je čeličanska zgura sklona širenju, ona treba odležati određeno vrijeme pa se tek tada može koristiti kao agregat u građevinarstvu. To se obavlja da bi se količina slobodnog vapna svela na prihvatljivu razinu. Stoga se čeličanska zgura ostavlja da odleži na deponiju barem četiri mjeseca, gdje je izložena raznim vremenskim utjecajima [12]. Zgura, a naročito čeličanska zgura, treba odležati neko vrijeme, obično šest mjeseci, prije nego što se može koristiti kao agregat u cestogradnji. Takav postupak starenja provodi se da bi se prije same upotrebe omogućila hidratacija slobodnog vapna ili kalcijevog karbonata, tj. da bi se spriječila prekomjerna ekspanzija tog materijala [13]. Vrijeme starenja trebalo bi varirati u rasponu od barem tri mjeseca do najviše osamnaest mjeseci, da bi se tako umanjila ekspanzivnost čeličanske zgre [14]. Da bi se riješio problem ekspanzivnosti, čeličanska se zgura pohranjuje u odlagalištima, gdje se izlaže vremenskim utjecajima u razdoblju od najmanje četiri mjeseca [15]. Mišljenja se razlikuju kada se raspravlja o vremenu starenja čeličanske zgre, a tu treba napomenuti da je i prilično malo radova napisano na temu o utjecaju vremena starenja čeličanske zgre na svojstva betona. Zbog toga je provedena detaljna analiza da bi se odredio utjecaj različitih vremena starenja čeličanske zgre na mehanička svojstva betona visokih uporabnih svojstava. Tijekom proizvodnje čelika može se dobiti nekoliko vrsta zgura, što ovisi o samom proizvodnom postupku. Tako primjerice razlikujemo baznu kisičnu zguru, zguru iz elektrolytne peći, zguru iz elektroindukcijske peći, zguru iz lonaca (bijelu zguru) itd. U ovom se radu isključivo obrađuje zgura iz elektroindukcijske peći kao dodatak betonu. Rezultati dobiveni tijekom ovog istraživanja mogli bi se koristiti u određivanju boljih udjela mješavina za beton visokih uporabnih svojstava, uz primjenu čeličanske zgre kao krupnozrnatog agregata.

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Materijali

U istraživanju je korišten obični portland cement (OPC) razreda čvrstoće 53 koji udovoljava zahtjevima iz norme IS 12269-1987 [16], riječni pijesak (RS) granulometrijske zone II dobiven iz korita rijeke Cauvery kod Karura, te kameni agregat

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva cementa

Relativna gustoća	Standardna konzistencija	Početak vezivanja	Kraj vezivanja	Tlačna čvrstoća [MPa]			Postojanost obujma (Lechatelier)
				3 dana	7 dana	28 dana	
3,15	32 %	58 min	215 min	27,50	41,61	57,32	3 mm



Slika 1. Čeličanska zgura kao agregat: a) sa slobodnim vapnom, hrapave površine; b) frakcije 1 i 2; c) na deponiji

od 20-milimetarskog pomiješanog dobro graduiranog tvrdog plavog granita (eng. *hard blue granite* - HBG). Kao mineralni dodatak korišten je leteći pepeo (eng. *fly ash* - FA) klase F, specifične gustoće 2,15, dobiven iz termoelektrane Mettur. Kao kemijski dodatak korišten je superplastifikator (SP) na bazi naftalen sulfonata koji udovoljava uvjetima iz norme IS 9103 – 1999 [17]. Čeličanska zgura proizvedena je u čeličani Raja Steels Private Ltd, u indijskom gradu Coimbatoreu. Za miješanje betona i njegu uzoraka korištena je pitka voda. Fizikalna i mehanička svojstva cementa ispitana su u skladu s normom IS: 4031-1988 [18]. Ta su svojstva prikazana u tablici 1.

## 2.2. Metode

Kontrolna mješavina pripremljena je od konvencionalnog betona (CC). Za detaljnu analizu pripremljen je i beton visokih uporabnih svojstava baziran na konvencionalnim materijalima i letećem pepelu. Korištena je čeličanska zgura u obliku oblutaka. Čeličanska zgura kao agregat dobivena je drobljenjem oblutaka i sortiranjem dobivenog materijala u dvije skupine prosijavanjem. U ovom su radu analizirane dvije frakcije: frakcija 1 koja prolazi kroz sito od 20 mm, a zadržava se na situ od 10 mm (F1), te frakcija 2 koja prolazi kroz sito od 10 mm, a zadržava se na situ veličine 4,75 mm (F2) (slika 1.b). Čeličanska zgura kao agregat je oštrobriđna, a površina joj je hrapava (slika 1.a). Zbog toga se odlično veže s matricom cementne paste.

Za smanjenje ekspanzivnosti čeličanske zgre kao agregata, u današnje se vrijeme primjenjuje nekoliko metoda starenja, a to su starenje na zraku, starenje vrućom vodom i starenje parom [19]. U ovom je istraživanju primjenjena metoda starenja na zraku (čeličanska je zgura pohranjena na otvorenom prostoru), jer se lakše provodi, a i cijena joj je prihvatljivija. Ta metoda uključuje skladištenje čeličanske zgre na tvrdom, suhom i ravnom tlu, pri čemu je materijal podijeljen na nominalne veličine (slika 1.c). Nakon šest mjeseci taj je materijal korišten u proizvodnji betona visokih uporabnih svojstava. Uzorkovanje agregata obavljeno je prema normi IS 2340 [20]. Reprezentativni uzorci uzeti su na raznim visinama i na raznim lokacijama unutar odlagališta. Dakle, uzorci su ravnomjerno uzeti s gornje trećine, srednje trećine i donje trećine hrpe. Tijekom uzorkovanja odstranjen je vanjski sloj u kojem je najvjerojatnije došlo do segregacije materijala, te su uzorci uzimani iz materijala koji se nalazi ispod površinskog sloja. Fizikalna i mehanička svojstva agregata prikazana u tablici 2 određena su prema normi IS 2386-1963 [21]. Ustanovljeno je da su ta svojstva u skladu s normom IS 383-1970 [22]. Agregati tipa HBG i SSA sadrže 60 % zrna iz frakcije 1 i 40 % zrna iz frakcije 2. Granulometrijske krivulje svih agregata prikazane su na slici 2.

Beton s čeličanskom zgurum kao agregatom (HPC1, HPC2, HPC3, HPC4, HPC5, HPC6 i HPC7) ispitan je u raznim vremenima starenja (6, 12, 18, 24, 30, 36 i 42 mjeseca) da

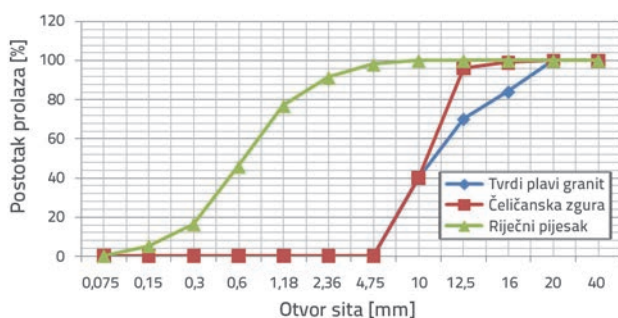
Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva agregata

Vrsta agregata	Relativna gustoća	Modul zrnatosti	Vodoupojnost [%]	Jedinična težina – nasipna gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Vrijednost drobljenja [%]	Vrijednost udara [%]	Vrijednost abrazije [%]
Tvrđi plavi granit	2,71	7,06	0,40	1719	26	25	23
Čeličanska zgura	2,89	6,64	1,90	1611	27	23	29
Riječni pijesak	2,64	2,67	1,00	1669	----	----	----

Tablica 3. Razni omjeri mješavina

Broj	Oznaka mješavine	Vodocementni faktor	Materijali [kg/m <sup>3</sup> ]								Starenje [mjeseci]	
			Cement	Leteći pepeo	Riječni pijesak	Tvrđi plavi granit		Čeličanska zgora		Voda		Superplastifikator
						F1	F2	F1	F2			
1	CC	0,32	584	-	596	687	458	-	-	187	-	-
2	HPC	0,32	438	146	596	687	458	-	-	187	11,7	-
3	HPC1	0,32	438	146	596	-	-	716	478	187	11,7	6
4	HPC2	0,32	438	146	596	-	-	716	478	187	11,7	12
5	HPC3	0,32	438	146	596	-	-	716	478	187	11,7	18
6	HPC4	0,32	438	146	596	-	-	716	478	187	11,7	24
7	HPC5	0,32	438	146	596	-	-	716	478	187	11,7	30
8	HPC6	0,32	438	146	596	-	-	716	478	187	11,7	36
9	HPC7	0,32	438	146	596	-	-	716	478	187	11,7	42

bi se ocijenio utjecaj vremena starenja čeličanske zgure. Mješavina je projektirana prema normi ACI 211.4R-93 [23] da bi se dobio beton klase C 50/60. Nakon opsežnih istraživanja ustanovljeno je da vodocementni faktor (v/c) iznosi 0,32 a količina cementa 584 kg/m<sup>3</sup>. U proračunu betonskih mješavina primijenjena je metoda apsolutnog obujma da bi se dobio beton veće gustoće. Za razliku od konvencionalnog betona, u beton visokih uporabnih svojstava dodaju se kemijski i mineralni dodaci. U ovom je istraživanju kao kemijski dodatak upotrijebljen superplastifikator na bazi naftalen sulfonata, dok je leteći pepeo klase F upotrijebljen kao mineralni dodatak. Odgovarajući omjeri su 2 % i 25 % od težine cementa, što je u skladu s uputama iz normi ACI 211.4R-93 [23] i IS 456-2000 [24]. Razni omjeri mješavina prikazani su u tablici 3.



Slika 2. Granulometrijske krivulje agregata

U usporedbi s ostalim agregatima koji su korišteni u ovom radu, čeličanska zgora se odlikuje većom relativnom gustoćom. Stoga je primijenjen postupak koji su usvojili Gencil i dr. [25] i to zato što su ga ti autori koristili za agregate velike gustoće. Izmjereni sastojci su izmiješani u betonskoj miješalici s nagibnim bubnjem. Materijali su dodavani sljedećim redoslijedom: krupnozrnati agregat, sitnozrnati agregat i cement. U početku su suhi materijali miješani jednu minutu, a nakon toga je dodano 80 % vode. Preostala je voda dodana nakon 1,5 minute miješanja. Sve mješavine

su miješane u ukupnom vremenu od 5 minuta. Vrijeme miješanja je svedeno na najmanju moguću mjeru da bi se izbjegla segregacija svježeg betona. Obradivost (slijeganje) proizvedenog betona određena je u skladu s normom IS 1199-1959 [26]. Uzorci su izrađeni u čeličnim kalupima, a zbijanje betona u kalupima je provedeno pomoću čelične šipke. Nakon 24 sata uzorci su izvađeni iz kalupa i odmah stavljeni u posudu s vodom radi njege. Vrijednosti tlačne čvrstoće, savojne čvrstoće i Youngovog modula određene su u skladu s normom IS 516-1959 [27]. Za ispitivanje tlačne čvrstoće korišteni su uzorci dimenzija 150 x 150 x 150 mm. Ispitivanje savojne čvrstoće obavljeno je na prizmama dimenzija 100 x 100 x 500 mm. Modul elastičnosti određen je opterećivanjem na tlak cilindričnih uzoraka promjera 150 mm, dužine 300 mm. Udarne čvrstoća betona određena je prema normi ACI 544.2R-89 [28]. Za to su korišteni betonski diskovi promjera 150 mm, debljine 65 mm. Uzorci su postavljeni točno u sredinu dna kružne podnožne ploče. Malj je postavljen u gornji položaj te je zatim pušten na uzorak. Postupak je ponavljan sve do sloma. Zatim je zabilježen broj udara potreban za postizanje sloma. Udarne čvrstoća uzorka izračunana je prema jednadžbi (1).

$$\text{udarna čvrstoća} = m \cdot g \cdot h \text{ x broj udara} \tag{1}$$

gdje je:

- m - masa malja
- g - ubrzanje zbog sile teže
- h - visina pada

Otpornost betona na abraziju određena je prema turskoj normi TS699. Iako se primjena te norme toplo preporučuje za abraziju prirodnog kamena, ova se norma također može koristiti i za betonske uzorke umjesto norme ASTM C779 [29]. Mnogi su istraživači uspješno primjenjivali tu metodu [25, 30, 31]. Uzorci dimenzija 70 x 70 x 50 mm korišteni su za određivanje otpornosti betona na abraziju. U skladu s normom TS699, sustav za određivanje otpornosti na abraziju



sastojao se od čeličnog diska promjera 750 mm s brzinom rotacije od  $30 \pm 1$  ciklusa u minuti, brojača i poluge. Tijekom samog ispitivanja najprije je  $20 \pm 0,5$  g abrazivne prašine posuto po disku i uzorak je stavljen u svoj položaj. Nakon toga je nanoseno opterećenje od 5 kg i disk je rotiran pet perioda (jedan period = 5 ciklusa). Zatim je očišćena površina diska i uzorka. Taj je postupak ponavlján za svaki rub betonskih uzoraka, i to tako da je uzorak u svakom periodu rotiran za  $90^\circ$ . U ovom je ispitivanju kao abrazivna prašina korišten korund. Stupanj trošenja uzorka određen je iz razlike u očitanjima prije i poslije abrazije uzorka. Za sva ispitivanja i za svako vrijeme ispitivanja (tablica 4.) pripremljena su i ispitana po tri uzorka za svaku mješavinu, nakon čega je za potrebe analize izračunana srednja vrijednost.

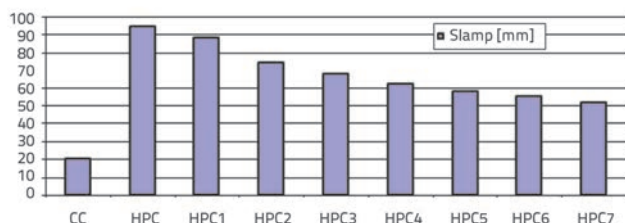
Tablica 4. Starost uzorak na dan ispitivanja

Ispitivanje	Starost na dan ispitivanja
Tlačna čvrstoća	7 dana, 28 dana, 56 dana i 91 dan
Savojna čvrstoća	7 dana i 28 dana
Modul elastičnosti	7 dana i 28 dana
Udarno ispitivanje	7 dana i 28 dana
Ispitivanje otpornosti na abraziju	7 dana i 28 dana

### 3. Rezultati i analiza

#### 3.1. Obradivost

Rezultati ispitivanja konzistencije betona metodom slijeganja prikazani su na slici 3. Kao što se vidi iz te slike, obradivost svih mješavina betona visokih uporabnih svojstava veća je od obradivosti konvencionalnog betona, i to zbog dodavanja letećeg pepela i superplastifikatora. Na obradivost je povoljno utjecao kružni oblik čestica letećeg pepela i manja veličina tih čestica. Obradivost mješavina betona visokih uporabnih svojstava s čeličanskom zgurum kao agregatom smanjuje se s povećanjem vremena starenja čeličanske zgure. Kako raste vrijeme starenja, tako raste i tvrdoća i površinska hrapavost čeličanske zgure kao agregata zbog vremenskih utjecaja, pa nastaje u gruba mješavina slabije obradivosti. Obradivost se može poboljšati povećanjem količine superplastifikatora. Međutim, ta je količina uvijek bila ista u ovom istraživanju da bi rezultati uspoređivanja bili što točniji.



Slika 3. Rezultati ispitivanja konzistencije betona metodom slijeganja

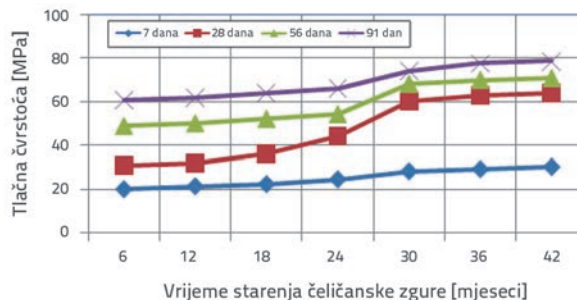
#### 3.2. Tlačna čvrstoća

Rezultati dobiveni ispitivanjem tlačne čvrstoće prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Rezultati dobiveni ispitivanjem tlačne čvrstoće

Broj	Oznaka mješavine	Tlačna čvrstoća [MPa]			
		7 dana	28 dana	56 dana	91 dan
1	CC	40,12	61,24	64,52	66,78
2	HPC	26,25	44,83	65,94	74,98
3	HPC1	20,16	30,79	48,94	60,58
4	HPC2	21,43	32,00	50,15	61,76
5	HPC3	22,44	36,08	52,19	63,88
6	HPC4	24,56	44,28	54,28	65,95
7	HPC5	28,10	60,11	68,15	73,98
8	HPC6	29,07	62,86	69,84	77,56
9	HPC7	30,06	63,96	70,68	78,50

Očekivalo se da će povećanje vremena starenja čeličanske zgure dovesti i do povećanja tlačne čvrstoće. Tlačna čvrstoća proizvedenih betona varirala je od 20,16 MPa do 40,12 MPa nakon 7 dana, od 30,79 MPa do 63,96 MPa nakon 28 dana, od 48,94 MPa do 70,68 MPa nakon 56 dana, te od 60,58 MPa do 78,50 MPa nakon 91 dana. Najviša vrijednost tlačne čvrstoće postignuta je za mješavinu HPC7, i to za sve starosti betona osim sedmodnevne. Tlačna čvrstoća mješavine HPC7 za 4, 10 i 18 posto je viša od mješavine CC (konvencionalni beton) nakon 28, 56 i 91 dana. Alizadeh i dr. [9] izvještavaju da beton s dodatkom zgure u agregatu postiže veće vrijednosti tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće, savojne čvrstoće i modula elastičnosti nego što je to slučaj kod betona s prirodnim agregatom. Rezultati iz ovog ispitivanja dobro se podudaraju s rezultatima iz [9], osim za sedmodnevno razdoblje. Odnos između vremena starenja čeličanske zgure i tlačne čvrstoće prikazan je na slici 4.



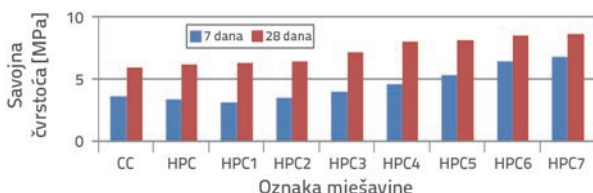
Slika 4. Odnos između vremena starenja čeličanske zgure kao agregata i tlačne čvrstoće

Kao što se može vidjeti na toj slici, duže vrijeme starenja čeličanske zgure dovodi do povećanja tlačne čvrstoće.

Međutim, istovremeno je utvrđeno da je porast tlačne čvrstoće nakon 30 do 36 mjeseci gotovo neznatan za sve ispitane starosti betona (npr. nakon 28 dana, tlačna čvrstoća iznosila je 60,11 MPa za mješavinu HPC5, 62,86 MPa za mješavinu HPC6, te 63,96 MPa za mješavinu HPC7). Stoga se može zaključiti da je potrebno barem 30 do 36 mjeseci starenja čeličanske zgre da bi se postigla tlačna čvrstoća koja odgovara tlačnoj čvrstoći konvencionalnog betona (npr. nakon 28 dana tlačna čvrstoća konvencionalnog betona iznosi 61,24 MPa).

### 3.3. Savojna čvrstoća

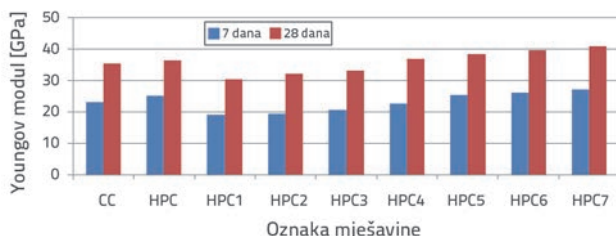
Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće betona prikazani su na slici 5. Uočeno je da je savojna čvrstoća mješavina betona visokih uporabnih svojstava s čeličanskom zgurom kao agregatom veća u usporedbi s konvencionalnim betonom (CC) nakon 28 dana njege. Najviša savojna čvrstoća nakon 7 i 28 dana zabilježena je za mješavinu HPC7 koja sadrži čeličansku zgurom kao agregat. Savojna čvrstoća te mješavine za 88 i 46 posto je viša u usporedbi s konvencionalnim betonom nakon 7 i 28 dana njege. Razlog postizanja bolje savojne čvrstoće leži u odličnoj vezi između hrapave i uglate čeličanske zgre i cementne paste.



Slika 5. Savojna čvrstoća betona

### 3.4. Youngov modul

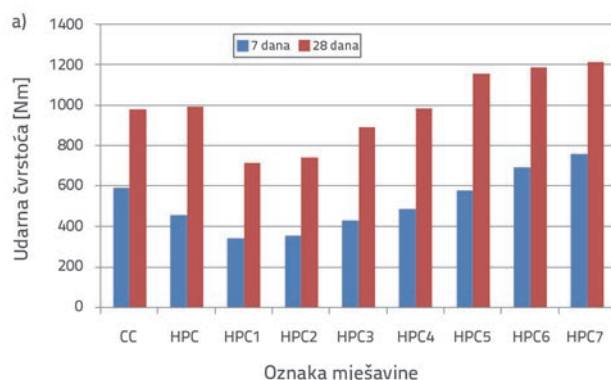
Vrijednosti Youngovog modula za beton prikazane su na slici 6. Youngov modul za betonske mješavine koje sadrže čeličansku zgurom kao agregat manji je ili sličan vrijednostima za konvencionalni beton nakon sedam dana njege. Međutim, nakon 28 dana njege, Youngov modul za betone HPC, HPC4, HPC5, HPC6 i HPC7 veći je za 3, 4, 8, 12 i 15 posto u usporedbi s konvencionalnim betonom. Ipak treba napomenuti da je Youngov modul za betone HPC1, HPC2 i HPC3 manji nego kod konvencionalnog betona.



Slika 6. Youngov modul ispitivanih mješavina betona

### 3.5. Udarne čvrstoća

Rezultati za udarnu čvrstoću betona prikazani su na slici 7.a, dok je način sloma uzoraka nakon ispitivanja udarne čvrstoće prikazan na slici 7.b. Udarne čvrstoća betona varira od 342,58 Nm do 756,78 Nm nakon 7 dana, te od 712,56 Nm do 1209,40 Nm nakon 28 dana. Ti rezultati pokazuju da je udarna čvrstoća mješavina HPC6 i HPC7 viša nego kod konvencionalnog betona nakon 7 dana njege. Kod tih je mješavina udarna čvrstoća za 17 i 28 posto viša od vrijednosti zabilježenih za konvencionalni beton. Udarne čvrstoća mješavina HPC, HPC4, HPC5, HPC6 i HPC7 viša je nego kod konvencionalnog betona nakon 28 dana njege. Udarne čvrstoća tih betonskih mješavina viša je za 1, 0,5, 18, 21 i 24 posto u usporedbi s konvencionalnim betonom. Međutim, udarne čvrstoća betona HPC1, HPC2 i HPC3 manja je nego kod konvencionalnog betona.

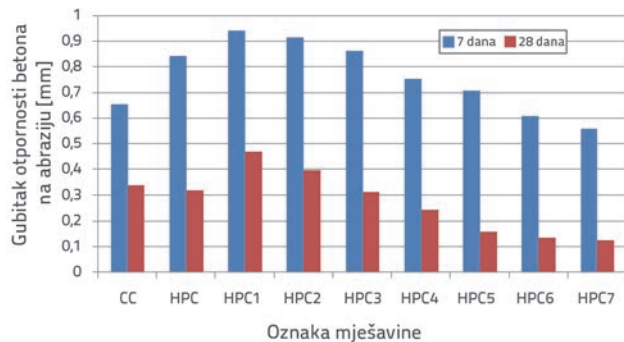


Slika 7. Udarne čvrstoća betona: a) rezultati ispitivanja; b) način sloma nakon ispitivanja

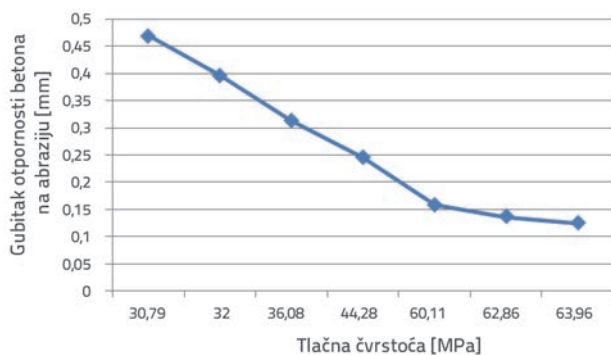
### 3.6. Abrazija

Vrijednosti gubitka otpornosti betona na abraziju prikazane su na slici 8. Gubitak otpornosti betona zbog abrazije pada s povećanjem vremena starenja čeličanske zgre. To pokazuje da otpornost na abraziju betona bitno raste usporedo sa starenjem čeličanske zgre, što je isti slučaj kao i kod tlačne čvrstoće, savojne čvrstoće, Youngovog modula i udarne čvrstoće. Odnos između tlačne čvrstoće i gubitka otpornosti betona na abraziju

nakon 28 dana prikazan je na slici 9. Kao što se na toj slici jasno vidi, gubitak otpornosti abrazijom betonskih mješavina smanjuje se s povećanjem tlačne čvrstoće. Mješavina HPC7 odlikuje se s najvećom tlačnom čvrstoćom i s najmanjim gubitkom zbog abrazije.



Slika 8. Gubitak otpornosti betona na abraziju



Slika 9. Odnos između tlačne čvrstoće i gubitka otpornosti betona zbog abrazije

#### 4. Zaključak

Na temelju rezultata postignutih u ovom istraživanju može se izvesti nekoliko vrlo važnih zaključaka.

Fizikalna i mehanička svojstva čeličanske zgre kao agregata slična su odgovarajućim svojstvima prirodnih agregata. Stoga se čeličanska zgra može koristiti kao zamjena za prirodni agregat u proizvodnji betona. Proces starenja čeličanske zgre utječe na svojstva betona u kojem se čeličanska zgra koristi kao krupnozrnat agregat.

Ako se čeličanska zgra kao agregat koristi u betonu prije starenja, tada slobodne čestice vapna u vapnenim džepovima čeličanske zgre mogu reagirati s vodom i početi se pojedinačno širiti, što dovodi do neravnomjernog naprezanja te posljedično do loše kakvoće betona. Kada se čeličanska zgra odlaže na odlagalište radi starenja, tada se rizik da će doći od ekspanzije slobodnog vapna smanjuje na minimum jer će na odlagalištu doći do hidratacije slobodnog vapna uslijed kontinuiranog izlaganja atmosferilijama, tj. zraku, kiši, vlazi itd. Nakon dugotrajnog starenja, slobodno se vapno u potpunosti gubi iz agregata. U tom se slučaju prazne vapneni džepovi, čime se povećava površina čeličanske zgre kao agregata, a to opet dovodi do boljega povezivanja agregata i cementne paste. Stoga se može reći da kvaliteta betona raste ako se čeličanska zgra koristi kao agregat tek nakon starenja.

Obradivost betona se smanjuje s povećanjem vremena starenja čeličanske zgre kao agregata. Povećanje razdoblja starenja čeličanske zgre kao agregata dovodi do povećanja tlačne čvrstoće. Najviša tlačna čvrstoća postignuta u betonu kojemu se kao krupni agregat dodaje čeličanska zgra veća je nakon 28, 56 i 91 dana za 4, 10 i 18 posto (HPC7) u usporedbi s konvencionalnim betonom. Starenje čeličanske zgre treba trajati barem 30 do 36 mjeseci da bi se postigla tlačna čvrstoća koja odgovara vrijednostima za konvencionalni beton. Međutim, starenje čeličanske zgre ne bi trebalo trajati duže od tog vremena jer je ustanovljeno da, nakon tog razdoblja, čvrstoća materijala raste izuzetno sporo. Savojna čvrstoća, Youngov modul i udarna čvrstoća betona rastu s porastom tlačne čvrstoće.

Gubitak otpornosti betona zbog abrazije smanjuje se s povećanjem tlačne čvrstoće. To pokazuje da se "otpornost betona na abraziju" također bitno povećava usporedo sa starenjem čeličanske zgre kao agregata. Općenito uzevši, usporedba svih rezultata čvrstoće između kontrolne mješavine i mješavina betona visokih uporabnih svojstava pokazuje da su rezultati mješavina betona visokih uporabnih svojstava na početku niži. U kasnijim razdobljima, rezultati ispitivanja slični su ili bolji od rezultata kontrolne mješavine. Može se zaključiti da se, nakon dovoljnog starenja, čeličanska zgra može koristiti kao agregat za beton zajedno s kemijskim i mineralnim dodacima, te da se na takav način dobiva beton više kvalitete.

#### LITERATURA

- [1] Bharatkumar, B.H., Raghuprasad, B.K.: Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete, *Materials and Structures*, 38 (2005) Jan-Feb, pp. 63-72.
- [2] Skazlic, M., Vujica, M.: Environmentally-friendly self-compacting concrete, *GRAĐEVINAR* 64 (2012) 9, pp. 905-913.
- [3] Singha Roy, D.K.: Suitability of blast furnace slag as coarse aggregate in concrete, *IE(I) Journal*, 88 (2007), May, pp. 57-61.
- [4] Netinger, I., Jelcic Rukavina, M., Bjegovic, D.: Possibility of using domestic slag as concrete aggregate, *GRAĐEVINAR* 62 (2010) 1, pp. 35-43.

- [5] Netinger, I., Bjegovic, D., Varevac, D., Morić D.: Use of slag from steel industry as concrete aggregate, GRADEVINAR 63 (2011) 2, pp. 169-175.
- [6] Maslehuddin, S., Alfarabi, M.: Comparisson of properties of steel slag and crushed lime stone aggregate concrete, Construction and building materials 17 (2003), pp. 105-112.
- [7] Akinbinu, V.A.: Comparisons of compressive strength of concrete block made with steel slag waste and iron ore tailing aggregate, Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on of solid waste technology and management, March 14-17, 2010, Philadelphia, USA.
- [8] Shih, P.H., Wu, Z.Z., Chiang, H.L.: Charateristics of bricks made from waste steel slag, Waste Management, 24 (2004) 10, pp. 1043 -1047.
- [9] Alizadeh, R., Chini, M., Ghods, P.: Utilization of EAFS as aggregate in concrete – Environmental issue, Sixth CANMET/ACI international conference on recent trends in advanced concrete technology, Bucharest, Romania, June 2003, pp. 451 – 464.
- [10] Shaopeng, W., Youngjie, X., Qunshan Y.: Utilization of steel slag as aggregate for stone mastic asphalt (SMA) mixtures, Building and Environment, 42 (2007), pp. 2580 – 2585.
- [11] Nadeem, M., Pofale, A.D.: Experimental investigation of using slag as alternative to normal aggregates in concrete, International journal of Civil and Structural Engineering, 3 (2012), pp. 117 – 127.
- [12] Patel, J.P.: Broader use of steel slag aggregates in concrete, Thesis of Masters of sciencedegree in civil engineering, Department of civil and Environmental engineering, Cleveland state university, December, 2008
- [13] Kalyoncu, R.S.: Slag-Iron and Steel, U.S. Geological Survey Minerals Yearbook-2001, pages 70.1-70.7, <[http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_&\\_steel\\_slag/790401.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/790401.pdf)>
- [14] User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Costruction, Publication Number: FHWA-RD97-148, United States Department of Transportation - Federal Highway Administration. <<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/for.cfm>>
- [15] Ameri, M., Shahabishahmiri, H.: Evaluation of the use of steel slag in concrete, 25th ARRB Conference -Shaping the future, Linking policy, research and outcomes, Perth, Australia 2012.
- [16] IS12269:1987, Specification for 53 Grade Ordinary Portland Cement, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [17] IS 9103:1999, Specification for admixtures for concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [18] IS4031:1988, Method of physical test for hydraulic cement, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [19] Moon, H.J., Yoo, J.H., Kim, S.S.: A Fundamental Study on the Steel Slag Aggregate for Concrete, Geosystem Eng., 5 (2002)2, pp. 38-45.
- [20] IS 2340:1986, Methods for sampling of aggregates for concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India
- [21] IS 2386:1963, Methods of test for aggregates for concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India
- [22] IS 383-1970, Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete. Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [23] ACI211.4R-93, Guide for selecting proportions for High Strength concrete with Portland Cement and fly ash, Reported by ACI Committee 211, American Concrete Institute, Detroit, USA
- [24] IS: 456 - 2000, Code of practice for Plain and Reinforced Concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India
- [25] Gencel, O., Ozel, C., Filiz, M.: Investigation on abrasive wear of concrete containing hematite, Indian journal of Engineering and material sciences, 18 (2011), Feb, pp. 40 – 48.
- [26] IS 1199:1959, Methods of sampling and analysis of concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India
- [27] IS: 516-1959, Methods of tests for strength of concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India
- [28] ACI544.2R-89, Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, Reported by ACI Committee 544, American Concrete Institute, Detroit, USA
- [29] ASTM C799, Test methods for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces, ASTM Standards, 2002
- [30] Oymael, S., Yeginobali, M.A.: The effect of bituminous schist on abrasion resistance of concrete, Fourth National conference on concrete, mineral and chemical admixtures in concrete technology, Istanbul, 1996, pp. 359 – 367.
- [31] Turk, K., Karatap, M.: Abrasion resistance and mechanical properties of self compacting concrete with different dosages of fly ash/silica fume, Indian journal of Engineering and material sciences, 18 ( 2011) Feb, pp. 49 – 60.