

primljen: 09.02.2023.
korigovan: 05.07.2023.
prihvaćen: 09.09.2023.

pregledni rad

UDK : 666.972.5

BETONI VISOKIH PERFORMANSI

Predrag Lukić¹, Vanja Lukić²

Rezime: Betoni visokih performansi su sve više popularniji u građevinarstvu kod izgradnje inženjerskih objekata. Ključni atributi betona visokih performansi u odnosu na klasičan beton su čvrstoća, duktilnost, i otpornost na agresivne uticaje sredine. Visoka trajnost ovih betona, dobra zaštita armature, dobra ugradljivost betona, dobra otpornost na habanje i dejstvo mraza, često su razlog više za primenu ovih betona. Primenom betona visokih performansi moguće je graditi konstruktivne elemente manjih dimenzija, odnosno masa. U ovom radu biće dat opšti pregled betona visokih performansi, kao i njegova primena u građevinarstvu.

Ključne reči: betoni visokih performansi, čvrstoća, duktilnost, trajnost

HIGH PERFORMANCE CONCRETES

Abstract: High-performance concretes are increasingly popular in the construction industry in the construction of engineering structures. The key attributes of high-performance concrete compared to classic concrete are strength, ductility, and resistance to aggressive environmental influences. The high durability of these concretes, good reinforcement protection, good workability of concrete, good resistance to wear and freezing, are often more reasons for using these concretes. Using high-performance concrete, it is possible to build structural elements of smaller dimensions, that is, masses. This paper will give a general overview of high-performance concrete, as well as of its application in construction.

Key words: high performance concretes, strength, ductility, durability

¹ Mast. inž. građ., doktorand, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, lukic.ing@gmail.com

² Mast. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, lukic.ing@gmail.com

1 UVOD

U poslednjih tridesetak godina primena betona visokih čvrstoća je doživela veliku ekspanziju. U početku je primena bila samo na objekte sa posebnim zahtevima, nakon čega se prešlo i na ostale, uobičajene građevine. Postizanje čvrstoće betona od 100 MPa i više ne predstavlja teškoće, i spravljanje betona ovih čvrstoća sve više se širi po raznim gradilištima kod nas i u svetu [1].

Naziv beton visokih performansi upotrebljava se za betone koji imaju čvrstoću na pritisak veću od određene vrednosti koja se vremenom povećavala. U početku je to bilo preko 30 MPa, a danas je u većini zemalja, pa i kod nas 60 MPa i više [1].

Povećanje primene ovih betona je ne samo zbog velike čvrstoće na pritisak, već i zbog dobre zaštite armature, povećane otpornosti na mraz i habanje, što sve doprinosi većoj trajnosti betonskih konstrukcija. Takođe, lakša ugradljivost i smanjena sopstvena težina konstruktivnih elemenata doprinosi proširenju primene ovih betona [1].

Svedoci smo činjenice da su objekti od običnog betona u jako lošem stanju zbog brojnih uticaja okoline, iako se dugo smatrao većitim materijalom, pa je pravi odgovor upotreba betona visokih čvrstoća. Visoka čvrstoća betona omogućuje smanjenje dimenzija nosača, što dovodi do smanjenja sopstvene težine konstrukcije, smanjenja inercijalnih sila pri dejstvu zemljotresa, a takođe, omogućava povećanje raspona konstrukcija. Dobijanje većih ranih čvrstoća sa smanjenjem sopstvene težine otvara nove mogućnosti u montažnoj gradnji, naročito industrijskih objekata [1,2].

Težnja građevinskih konstruktera je usmerena na razvoj i praktičnu primenu konstrukcijskih sistema, kojima se, uz primenu postojećih i novih materijala, omogućava proširenje polja primene odgovarajućih konstrukcija po rasponu, nameni objekta ili drugim kriterijumima vrednovanja projekta. Uz primenu postojećih ili novih tehnologija građenja kojima se olakšava izvođenje, skraćuje vreme izgradnje, olakšava eksploatacija i održavanje uz druge prednosti, moguće je ostvarenje nedostignutih dometa. Takođe, izboru optimalnog rešenja konstrukcije prethodi i analiza sa tehničkog i ekonomskog stanovišta [1].

2 RAZVOJ BETONA VISOKIH PERFORMANSI

Zahvaljujući vrlo intenzivnom razvoju tehnologije betona, stalno raste nivo mehaničkih čvrstoća, pa se danas u dobro organizovanim i opremljenim pogonima može dobiti beton čije čvrstoće na pritisak nakon 28 dana premašuju 100 MPa. Istraživači na polju tehnologije betona dali su doprinos stalnoj težnji građevinskih konstruktera za osvajanjem novih materijala znatno boljih mehaničkih i drugih karakteristika. Tako je nastao beton znatno većih mehaničkih karakteristika u odnosu na svojstva primenjivanog betona - klasičnog betona [2]. Polovinom dvadesetog veka čvrstoća betona na pritisak se kretala od 30-40 MPa, pa su krajem prošlog veka dostignute vrednosti od 60 MPa. Porastu mehaničkih karakteristika betona postupkom uobičajene proizvodnje, značajno su doprinele kvalitetne komponente materijala koje ulaze u sastav betonske mešavine, naročito pojava novih vrsta aditiva. Ova granica se vremenom menjala. Obično, s obzirom na čvrstoću na pritisak, betone delimo na obične – normalne betone, betone visoke čvrstoće, betone vrlo visoke čvrstoće i specijalne betone, tabela 1, [1].

Tabela 1 - Podela betona prema čvrstoći na pritisak [1]

Redni broj	Opis betona	Čvrstoća na pritisak
1	Betoni normalne čvrstoće	20-60 MPa
2	Betoni visoke čvrstoće	60-100 MPa
3	Betoni vrlo visoke čvrstoće	100-150 MPa
4	Specijalni betoni (ultravisoke čvrstoće)	>150 MPa

Najčešća definicija betona visokih čvrstoća je prema American Concrete Institute (ACI), da je to beton takvih posebnih osobina koji se može dobiti uobičajenim postupcima proizvodnje, ugradnje i nege betona [3]. Prema nekim autorima beton visoke čvrstoće je beton sa vodocementnim faktorom ≤ 0.40 [4].

Prema Evrokodu 2 betoni su svrstani u klase gde se beton do klase C55/60 smatra običnim, a iznad te klase su betoni visoke čvrstoće [5].

Betoni visoke čvrstoće imaju i druge, poboljšane osobine kao što su trajnost i otpornost na agresivne uticaje sredine. Visoka trajnost ovih betona, dobra zaštita armature, dobra ugradljivost betona, dobra otpornost na habanje i dejstvo mraza, često su razlog

više za primenu ovih betona, a ne samo čvrstoća betona na pritisak.

3 KOMPONENTE BETONA VISOKIH PERFORMANSI

Pri izboru komponenata za beton visoke čvrstoće potrebna je veća pažnja nego pri spravljanju betona obične čvrstoće. Komponente betona su cement, agregat, voda, hemijski i mineralni dodaci. Prve tri komponente su obavezne, a hemijski i mineralni dodaci se razlikuju u zavisnosti od osobina koje želimo postići. Razlika u odnosu na obične betone je što kod betona visoke čvrstoće obavezno koristimo superplastifikator. Posebno je važno utvrditi međusobnu usaglašenost između cementa, hemijskih i mineralnih dodataka. Ovo se, uglavnom, proverava probnim mešavinama. Može se reći da betoni visoke čvrstoće zahtevaju veću količinu cementa ($\geq 400\text{kg/m}^3$) i manji vodocementni faktor. U pogledu granulometrijskog sastava postoji dobra sličnost sa običnim betonom, ali sa većim učešćem sitnijih frakcija agregata. Kada su u pitanju aditivi, obavezno se dodaju superplastifikatori ili/i razni drugi dodaci u zavisnosti od osobina koje želimo postići. Osobine cementa kao što su klasa čvrstoće, hemijski i mineralni sastav i finoća mliva ukazuju na pogodnost primene ovog cementa za izradu betona visoke čvrstoće. Kao mineraloški dodatak najviše je u upotrebi silicijumska prašina (SiO_2). Ovaj materijal sadrži 85-98% silicijum dioksida i najfinija zrna prečnika manjeg od $0.1\mu\text{m}$. Silicijumska prašina je vrlo aktivna, tako da 1kg silicijumske prašine zamenjuje 3-4kg cementa pri čemu se čvrstoća betona ne menja. Beton se posmatra kao trofazni sistem koji čini cementni kamen, agregat i tranzitna zona (inter-face) između agregata i cementnog kamena. Slom betona je uvek po najslabijoj od ove tri faze. Da bi se dobila veća čvrstoća betona na pritisak potrebno je da svaka od ovih faza bude što kvalitetnija i homogenija. Treba težiti što boljoj vezi cementa i agregata koja se obično smatra najslabijim mestom u betonu. Boljom vezom cementnog kamena i agregata može se dogoditi da najslabije mesto u betonskom kompozitu bude agregat, pa tada treba ugraditi kvalitetan i čist agregat. U zavisnosti od osobina koje želimo postići kod betona visoke čvrstoće i visokih performansi zavisi i izbor komponenti, posebno cementa i tipa superplastifikatora. Prethodno treba dokazati međusobnu usaglašenost ove dve komponente. U odnosu na obične betone, kod betona visoke čvrstoće treba ići sa cementima veće finoće mliva, što je

nepovoljno sa stanovišta reologije. Upotreba mineralnih dodataka betonu je opravdana ako se dobijaju bolje osobine svežeg i očvrslog betona i ako su ekonomski i ekološki prihvatljivi. Sa superplastifikatorima postizemo bolju ugradljivost betona uz istu ili manju količinu vode. Poželjno je upotrebljavati superplastifikatore novije generacije, jer su stariji razvijeni pre upotrebe betona visoke vrstoće. Pojedine vrste superplastifikatora za isti cement nemaju istu efikasnost. Ako hoćemo veće trajne čvrstoće, potrebna je veća količina superplastifikatora i najmanja količina vode. Za bolju ugradljivost betona treba najveća količina vode sa kojom postizemo zahtevanu čvrstoću, a količinu superplastifikatora određujemo kako bismo dobili potrebnu ugradljivost betona. Uglavnom se upotrebljavaju superplastifikatori u tečnom stanju zbog lakše dozaže i razgradljivosti [1].

Pored silikatne prašine upotrebljava se leteći pepeo i zgura. Leteći pepeo se obično upotrebljava u iznosu oko 15% od težine cementa za betone čvrstoće na pritisak do 100 MPa. Zgura se dozira od 10-30% od težine cementa uz kombinaciju sa 10% SiO_2 . Zgura i leteći pepeo zamenjuju jedan deo ukupne količine cementa. Agregat kao komponenta sa najvećim učešćem u sastavu betona, značajno utiče svojim karakteristikama na osobine betona. Izborom agregata kod betona visoke čvrstoće značajno se utiče na krajnje čvrstoće betona. Agregat na osobine očvrslog betona utiče svojim poreklom (prirodni, rečni, drobljeni), oblikom, teksturom, granulometrijskim sastavom, mineraloškim sastavom i fizičko-mehaničkim karakteristikama. Mnogobrojnim istraživanjima došlo se do saznanja da se, primenom drobljenog agregata, postižu bolji rezultati u pogledu dostizanja visoke čvrstoće betona. Veće čvrstoće na pritisak se dobijaju sa drobljenim agregatom za 30-40% u odnosu na ostale agregate [6]. Dobrom granulometrijskom sastavu agregata mora se posvetiti posebna pažnja, naročito odnosu krupnog i sitnijeg agregata. Za veće čvrstoće na pritisak značajan je izbor krupnog agregata. Kod većeg učešća krupnijeg zrna agregata smanjuje se količina cementnog kamena, a dolazi i do povećanja poroznosti i heterogenosti na kontaktu cementnog kamena i agregata. Za spravljanje betona visoke čvrstoće jednako su dobri agregati od krečnjaka, dolomita ili granita, ukoliko je dobar granulometrijski sastav, oblik i tekstura zrna [7]. Sa povećanjem čvrstoće na pritisak, povećava se i krtost betona. Prema istraživanjima nekih istraživača se vidi da, sa porastom čvrstoće na pritisak do karakteristične čvrstoće 70-80 MPa raste i duktilnost [8]. Uzorci gde

je dostignuta karakteristična čvrstoća veća od 70-80 MPa pokazali su smanjenu duktilnost. Mnogi propisi kao američki (ACI-propisi) obezbeđuju duktilnost ograničenjem koeficijenta armiranja zategnutom armaturom, a Evrokode 2 ograničava visinu pritisnutog dela betona za različite klase betona. Kod elemenata napregnutih na savijanje, pritisnuta armatura pojačava pritisnutu zonu betona, odnosno omogućava da se zatežuća armatura plastično deformiše pre sloma betona. Problem krтости betona može se ublažiti i mikroarmiranjem vlaknima. Za povećanje duktilnosti, čvrstoće na savijanje i sigurnosti na pojavu prslina betona visokih čvrstoća, upotrebljavaju se čelična vlakna, a za povećanje otpornosti na požar polimerna vlakna [1].

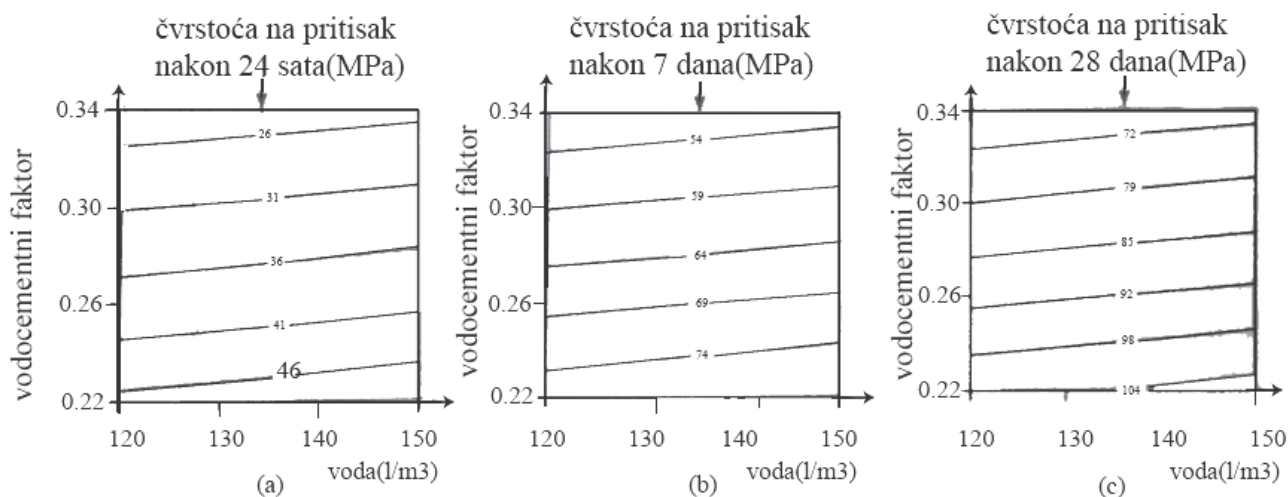
4 MEHANIČKE I REOLOŠKE OSOBINE BETONA VISOKIH PERFORMANSI

Kod betona visoke čvrstoće se podrazumeva i očekuje da pored visoke čvrstoće na pritisak ima i ostale povećane i kvalitetnije karakteristike u odnosu na obične betone. Neke osobine su posebno značajne, jer prave razliku u mehaničkim osobinama običnog i betona visokih čvrstoća i performansi. Mehaničke osobine agregata kod običnih betona nemaju veliki uticaj na mehaničke osobine betona, jer one kod običnog betona, uglavnom, zavise od vodocementnog faktora i čvrstoće cementnog kamena koji je završio hidrataciju, odnosno od njegove veze s agregatom.

Zahvaljujući ovome, kod običnih betona je jednostavnije doći do odnosa čvrstoće betona na pritisak i ostalih mehaničkih osobina. U slučaju betona visokih čvrstoća i performansi u zavisnosti od komponenata koje ulaze u sastav betona, veza cementnog kamena i agregata nije uvek najslabije mesto, pa veza/odnos između čvrstoće betona na pritisak i ostalih mehaničkih osobina nije ista kao kod običnih betona. Poznato je da npr. kod ubrzanog očvršćavanja običnog betona, sa zaparivanjem, dobijamo veće rane čvrstoće koje su manje nakon 28 dana nego kod betona sa normalnim očvršćavanjem. Kod betona visokih čvrstoća ovo nije slučaj. Za ove betone je veoma značajna nega betona u prvih 24 sata (više nego kod običnih betona). Pomanjkanje nege kod tih betona u prvih 24 sata može dovesti do smanjenja čvrstoće na pritisak očvrstlog betona. U sledećoj tabeli 2. i na slici 1. date su vrednosti čvrstoće na pritisak nakon 28 dana u zavisnosti od vodocementnog faktora i količine vode [4].

Tabela 2 - Zavisnost visoke čvrstoće betona na pritisak i vodocementnog faktora

Vodocementni faktor	Raspon čvrstoća na pritisak MPa
0,40-0,35	50-75 MPa
0,35-0,30	75-100 MPa
0,30-0,25	100-120 Mpa
0,25-0,20	>125 MPa



Slika 2 – Zavisnost čvrstoće na pritisak betona visoke čvrstoće od vodocementnog faktora i količine vode [1]

Beton visoke čvrstoće je homogeniji materijal od običnog betona, ima veći modul elastičnosti, pri čemu je brzina rasta čvrstoće na pritisak veća od brzine rasta

modula elastičnosti. Radni dijagram ovih betona je približno linearan, skoro do čvrstoće na pritisak. Zato

kod vitkih elemenata od ovih betona, izloženih velikim naponima dolazi i do velikih deformacija.

Ima predloga da se zbog malog odnosa w/c ovih betona, njihova čvrstoća na pritisak ispituje nakon 56 i/ili 90 dana umesto 28, kao kod običnih betona. Zbog mogućnosti upoređenja i čvrstoća na pritisak betona visokih čvrstoća se ispituje nakon 28 dana. Mnogi empirijski obrasci dati za obične betone ne važe za betone visokih čvrstoća. Tako, kod betona visoke čvrstoće za istu vrednost čvrstoće na pritisak, vrednost čvrstoće na savijanje i čvrstoće na zatezanje pri cepanju mnogo više se menjaju nego kod običnih betona [1].

Skupljanje betona visokih čvrstoća, kao deformacije nezavisne od opterećenja, sastoji se od skupljanja betona usled temperaturnih promena, skupljanja od isušivanja i autogenog skupljanja. Kod ovih betona ukupno skupljanje je manje nego kod običnih betona. Ista saznanja u pogledu tečenja koja važe za obične betone, važe i za betone visokih čvrstoća. Ovi betoni imaju veću krutost, odnosno modul elastičnosti, pa im je veća i čvrstoća na zamor usled cikličnog opterećenja [9]. Poroznost je takođe, manja u odnosu na obične betone, a manje su kapilarna i ukupna poroznost. Pore su međusobno nepovezane, a to u velikoj meri doprinosi većoj trajnosti ovih betona [9].

Kod betona visoke čvrstoće (visokih performansi) je zbog manjeg vodocementnog faktora, homogenije strukture i upotrebe silikatne prašine, manja je kapilarna i ukupna poroznost. Naročito je poboljšana veza cementnog kamena i agregata.

5 PRIMENA BETONA VISOKIH PERFORMANSI U SVETU

Upotreba betona visokih performansi, najviše se koristi kod izgradnje visokih zgrada, mostova, robnih kuća, garaža, tunela, naftnih platformi i sl. Primena betona visokih čvrstoća ogleda se u njegovoj ekonomičnosti, smanjenju dimenzija poprečnog preseka, što dovodi do smanjenja sopstvene težine. Ovo ima za posledicu bržu gradnju, dobijanje vitkih konstrukcija, mogućnost savladavanja velikih raspona, veću otpornost na agresivne uticaje sredine i manje deformisanje u toku vremena. Neki od objekata gde je korišćen betona visokih performansi su [1]:

- Most Sandhornya u Norveškoj,
- Most Salhus u Norveškoj,
- BfG zgrada, Frankfurt na Majni, Nemačka,
- Most Ile de Ré u Francuskoj,
- Most Normandie u Francuskoj,

- Most i tunel Veliki Belt (Great Belt), u Danskoj,
- Toranj Baiyoke-2 Tower Bangkok u Tajlandu.

6 ZAKLJUČAK

Kao materijal koji može uspešno odgovoriti zahtevima nosivosti, trajnosti, funkcionalnosti i ekonomičnosti nameću se betoni visokih performansi.

Proizvodnja betona visokih performansi je skuplja od proizvodnje običnog betona. Očekivati je da zbog toga više bude u upotrebi običan beton, međutim, zbog svojih izuzetnih svojstava postoje objekti koje je ekonomski opravdano graditi betonom visokih performansi.

Takvi objekti su naftne platforme, visoke zgrade, mostovi, razni konstruktivni elementi inženjerskih objekata, gde je potrebna povećana otpornost na agresivno delovanje sredine, objekti gde se želi postići što veća trajnost i savladati veliki rasponi.

LITERATURA

- [1] Futula Boško: **Grafična stanja armiranobetonskih montažnih dvopojasnih nosača od betona visokih čvrstoća. Doktorska disertacija**, Univerzitet u Beogradu građevinski fakultet, 2013.
- [2] Aćić Mirko, Ulićević Mladen, Sindić-Grebović Radmila: **Betoni visokih čvrstoća. Monografija povodom 50 godina Građevinskog fakulteta u Beogradu**, str. 13- 32, 1999.
- [3] HPC Technology Delivery Team: **High Performance Concrete Structural Designers. Guide**, CD, 2005.
- [4] Aitcin Pierre-Claude :**High – Performance Concrete. E FN SPON**, London, 1998.
- [5] Aitcin Pierre-Claude, Neville Adam: **High-performance concrete demystified. Concrete International**, pp 21-26, January 1993,
- [6] Muravljov Mihailo, Kovačević, T.: **Mogućnosti dobijanja betona visokih čvrstoća od rečnog i drobljenog agregata. Monografija povodom 70 godina života dr Milorada Ivkovića**, Građevinski fakultet Beograd, str. 165-168, 1995.
- [7] Aćić Mirko,: **Savremene betonske konstrukcije. Monografija posvećena sedamdesetogodišnjici života prof. dr Milorada Ivkovića**, Građevinski fakultet, Beograd, 1994.
- [8] Ržanicin A. R.: **Teorija puženja materijala. Građevinska knjiga**, Beograd, 1974., 358 str.
- [9] Meht P. Kumar, Aitcin Pierre-Claude: **Principles underlying production of highperformance**

concrete. *Cement, Concrete and Agregates*, 12(2),
70- 78, Winter 1990.