

# Smanjenje mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće nakon požara

Neno Torić, Ivica Boko, Bernardin Peroš

## Ključne riječi

beton velike čvrstoće, požar, mehanička svojstva, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, tangentni modul elastičnosti, sekantni modul elastičnosti

## Key words

high-strength concrete, fire, mechanical properties, compressive strength, tensile strength, tangent modulus of elasticity, secant modulus of elasticity

## Mots clés

béton à haute résistance, incendie, propriétés mécaniques, résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité tangent, module d'élasticité sécant

## Ключевые слова

высокопрочный бетон, пожар, механическая свойства, прочность на сжатие, прочность на разрыв, касательный модуль упругости, секущий модуль упругости

## Schlüsselworte

Beton hoher Festigkeit, Brand, mechanische Eigenschaften, Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, tangenter Elastizitätsmodul, sekanter Elastizitätsmodul

N. Torić, I. Boko, B. Peroš

Prethodno priopćenje

## Smanjenje mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće nakon požara

Prikazani su rezultati eksperimentalnog određivanja preostalih mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće nakon požara. Ispitivano je: tlačna i vlačna čvrstoća te tangentni i sekantni modul elastičnosti. Ispitivanja su se provodila zagrijavanjem betonskih uzoraka na ciljanu visoku temperaturu. Osim mehaničkih svojstava betona prikazana su i preostala svojstva nakon hlađenja uzoraka. Rezultati su uspoređivani s vrijednostima navedenih svojstava danih u EN1992-1-2 i EN1994-1-2.

N. Torić, I. Boko, B. Peroš

Preliminary note

## Degradation of mechanical properties of high-strength concrete after exposure to fire

The results obtained by experimental determination of residual mechanical properties of high-strength concrete after fire exposure are presented. The following properties are analyzed: compressive strength and tensile strength, and the tangent and secant moduli of elasticity. The testing is conducted by heating concrete samples to a high target temperature. In addition to mechanical properties of concrete, other properties registered after sample cooling are also presented. The results are compared with corresponding properties given in EN1992-1-2 and EN1994-1-2.

N. Torić, I. Boko, B. Peroš

Note préliminaire

## Dégradation des propriétés mécaniques du béton à haute résistance sous conditions d'incendie

Les résultats obtenus par l'analyse expérimentale des propriétés mécaniques résiduelles du béton à haute résistance soumis à l'incendie sont présentés. Les propriétés suivantes sont analysées: résistance à la compression et résistance à la traction, et modules d'élasticité tangent et sécant. L'essai a été conduit en chauffant l'échantillon jusqu'à une température de cible élevée. En plus des propriétés mécaniques de béton, les autres propriétés enregistrées après le refroidissement d'échantillon sont également présentées. Les résultats sont comparés avec les propriétés correspondantes figurant dans EN1992-1-2 et EN1994-1-2.

Н. Торич, И. Бок, Б. Перош

Предварительное сообщение

## Снижение механических свойств высокопрочного бетона после пожара

Приведены результаты экспериментального определения остаточных механических свойств высокопрочного бетона после пожара. Проведены испытания прочности на сжатие и разрыв, а также касательного и секущего модулей упругости. Испытания проводились путем нагревания бетонных образцов до заданной высокой температуры. Помимо механических свойств приведены и другие свойства после охлаждения образцов. Произведено сравнение результатов со значениями указанных свойств, данных в EN1992-1-2 и EN1994-1-2.

N. Torić, I. Boko, B. Peroš

Vorherige Mitteilung

## Minderung mechanischer Eigenschaften des Betons hoher Festigkeit nach dem Brand

Dargestellt sind Ergebnisse der experimentalen Bestimmung der übergebliebenen mechanischen Eigenschaften des Betons hoher Festigkeit nach dem Brand. Geprüft wurde Druck- und Zugfestigkeit sowie die tangentialen und sekanten Elastizitätsmodul. Die Prüfungen führte man durch Heizung der Betonproben auf gezielte hohe Temperatur durch. Ausser der mechanischen Eigenschaften des Betons sind auch die übrigen Eigenschaften nach dem Kühlen dargestellt. Die Ergebnisse verglich man mit den Werten der angeführten Eigenschaften in EN1992-1-2 und EN1994-1-2.

Autori: Neno Torić, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. Ivica Boko, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. Bernardin Peroš, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu

## 1 Uvod

Preostala mehanička svojstva običnog betona (OB) i betona velikih čvrstoća (BVČ) predmet su intenzivnih eksperimentalnih istraživanja od sredine dvadesetog stoljeća, sa svrhom određivanja ponašanja betona kao građevinskog materijala na visokim temperaturama. Betonom velikih čvrstoća smatra se mješavina betona čiji valjkasti uzorci imaju tlačnu čvrstoću veću od 60 Mpa. U preostala mehanička svojstva betona ubrajaju se: tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, dijagrami naprezanje-deformacija te sekantni i tangenti modul elastičnosti koji predstavljaju osnovne ulazne parametre za numeričke modele mehaničke nosivosti i pouzdanosti konstrukcija [2, 3].

Pod pojmom preostala svojstva podrazumijevaju se karakteristike materijala nakon djelovanja požara i hlađenja konstrukcije na atmosfersku ili sobnu temperaturu. Eksperimentalne vrijednosti preostalih mehaničkih svojstava ovise o procedurama ispitivanja (režim zagrijavanja, vrijeme održavanja konstantne temperature u uzorku i uvjeti čuvanja uzoraka prije ispitivanja) koje su se uvelike razlikovale kod pojedinih istraživača tijekom vremena. Međutim, osnivanjem udruge RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) definirani su ujednačeni postupci za ispitivanje mehaničkih svojstava betona izloženog visokim temperaturama utemeljeni na iskustvu velikog broja znanstvenika koji pripadaju navedenoj udruzi.

Većina provedenih istraživanja preostalih mehaničkih svojstava [7, 10, 12] pokazuje na izraženiju redukciju mehaničkih karakteristika BVČ-a u odnosu na OB u nižem temperaturnom području, kao i veliko odstupanje rezultata istraživanja u odnosu na pojedini tip betona. Gubitak tlačne čvrstoće BVČ-a pri temperaturama od 200-300 °C iznosi oko 40 %, nakon čega stupanj redukcije lagano opada do temperatura 400-450 °C. Pri temperaturama višim od 450 °C redukcija tlačne čvrstoće BVČ-a i OB-a je u istim omjerima. Potrebno je navesti i da se rezidualna tlačna čvrstoća uzoraka povećava ako je uzorak opterećen pri zagrijavanju, što je poglavito izraženo u višem temperaturnom području s porastom od oko 20 % u odnosu na čvrstoću neopterećenog uzorka.

Dio istraživača pratio je redukciju tlačne čvrstoće tijekom vremena nakon inicijalnog hlađenja uzoraka [6]. Zaključeno je da se tlačna čvrstoća BVČ-a dodatno reducira oko 10 % u odnosu na rezidualnu tlačnu čvrstoću dobivenu nakon hlađenja uzorka na sobnu temperaturu i dostiže svoj minimum 2-8 tjedana nakon inicijalnog hlađenja. Nakon dostizanja minimuma tlačna čvrstoća uzorka lagano raste približno 5 %. Tlačna čvrstoća OB-a ponaša se slično kao i tlačna čvrstoća BVČ-a samo što je redukcija izraženija i iznosi oko 15-20 % s većim

porastom čvrstoće, u nekim slučajevima i potpunim povratom rezidualne čvrstoće nakon inicijalnog hlađenja uzorka.

Preostala vlačna čvrstoća BVČ-a [1] doživljava lagani pad do 200°C (u nekim slučajevima i lagani porast) nakon čega slijedi nagli linearni pad u višem temperaturnom području što vrijedi i za rezidualnu vlačnu čvrstoću OB-a.

Degradacija preostalog tangentsnog i sekantsnog modula elastičnosti za oba tipa betona jest u istim omjerima te je okarakterizirana naglom redukcijom od oko 65 % do 200 °C, u području na kojem ne dolazi do redukcije modula sve dok temperatura ne prijeđe 300°C i laganim linearnim padom na višim temperaturama.

Dijagrami naprezanje-deformacija dobivaju se pri određivanju tlačne čvrstoće uzorka i okarakterizirani su statičkim modulom elastičnosti, tlačnom čvrstoćom i maksimalnom deformacijom pri slomu uzorka.

Navedeni rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazuju da različiti tipovi mješavina betona, specijalni dodaci (silicijska prašina, zgura, polipropilenska vlakna), granulometrijska krivulja i tip agregata, uvjeti čuvanja, kao i sam materijal beton koji je ocijenjen kao heterogen i anizotropan materijal, uvelike utječu na rezultate ispitivanja rezidualnih karakteristika te da se ponašanje pojedinih parametara može analizirati i uspoređivati jedino kroz trendove ponašanja. Nadalje, činjenica da se preostala svojstva betona mijenjaju nakon inicijalnog hlađenja u vremenu upozorava na potrebu da se karakteristike betona ispituju u određenim vremenskim intervalima, počevši od trenutka kad je uzorak zagrijan na maksimalnu temperaturu, ohlađen na sobnu temperaturu te kad se u hladnom stanju čuvao u laboratorijskim uvjetima određeno razdoblje. Spoznaja o vremenskoj promjenjivosti osnovnih mehaničkih karakteristika za različite betone upućuje na jedinstvenost pojedinog istraživanja koje se provodi za promatrani beton, kao i na činjenicu da eksperimentalna procedura određivanja mehaničkih karakteristika mora biti normirana i u skladu s procedurama ispitivanja koje slijede ostali znanstvenici u području eksperimentalnih istraživanja. Slijedom ovih spoznaja, a radi planiranih istraživanja o ponašanju predgotovljenih šupljih prednapetih ploča na visokim temperaturama, provedena su ispitivanja prikazana u ovome radu.

## 2 Ispitivanje preostalih mehaničkih svojstava betona visoke čvrstoće

### 2.1 Uvod

Cilj je ovoga ispitivanja je određivanje preostalih mehaničkih svojstava uzoraka mješavine BVČ-a koja je specifična za proizvodnju predgotovljenih šupljih predna-

petih betonskih ploča, uz uporabu najčešće rabljenih eksperimentalnih metoda. Preostala mehanička svojstva određuju se u vremenskom intervalu od 48, 72 i 96 sati nakon inicijalnog hlađenja uzorka da bi se stekao bolji uvid u kratkotrajno smanjenje mehaničkih svojstava u vremenu.



Slika 1. Prikaz betonskih uzoraka u električnoj peći

Eksperimentalne metode provedene su prema preporukama RILEM-a, i to za ispitivanje tlačne čvrstoće i sekantnog modula elastičnosti u potpunosti, dok je određivanje vlačne čvrstoće provedeno cijepanjem uzoraka (Braziliska metoda) iako je drugačija metoda (vlačni test) opisana u navedenim preporukama. Također su provedena ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti na uzorcima primjenom ultrazvučne metode (mjerjenje vremena prolaska zvuka kroz uzorak). Istraživači smatraju da je dinamički modul približno jednak inicijalnom tangentnom modulu elastičnosti iako ne postoji direktno fizičko objašnjenje njihove jednakosti [11]. Sukladno tome, dinamički se modul rabio za procjenu tangentnog modula elastičnosti. Opisana istraživanja provedena su u laboratoriju Zavoda za materijale građevinskog fakulteta u Zagrebu 2010. godine.

## 2.2 Sastav betona

U tablici 1. dan je sastav ispitne mješavine betona. Frakcija kamenog agregata 0-4 i 4-8 mm podrijetlom je riječni šljunak iz rijeke Neretve u Čapljini. Agregat je, s obzirom na provedenu petrološku analizu, klasificiran kao vapnenački agregat.

Tablica 1. Receptura ispitne mješavine betona

Cement ( $\text{kg/m}^3$ )	425
Frakcija agregata 0-4 mm ( $\text{kg/m}^3$ )	1510
Frakcija agregata 4-8 mm ( $\text{kg/m}^3$ )	266
Vodocementni faktor	0,33-0,34
Plastifikator RHEOFIT 700 (kg)	4,25

## 2.3 Osnovni zahtjevi procedure ispitivanja

Zahtjevi procedure ispitivanja poglavito se odnose na postizanje zadanog režima zagrijavanja i hlađenja uzorka, upotrebu uzoraka karakterističnih dimenzija, specificiranu brzinu nanošenja opterećenja te propisanu starost uzoraka.

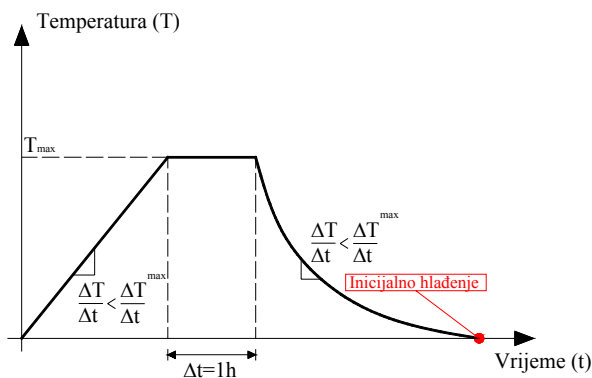
Slijedom uvjeta koje RILEM zahtijeva za oblik i dimenzije uzoraka (u ovisnosti o maksimalnom zrnju agregata), uzorci betona za ispitivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti cilindričnog su oblika s odnosom promjer/visina 1/3 (75/225 mm), dok su za ispitivanje vlačne čvrstoće uporabljani uzorci s odnosom 1/2 (75/150 mm). Uzorci za ispitivanje stari su najmanje 5 mjeseci što zadovoljava kriterije RILEM-a (minimalna je starost uzoraka 3 mjeseca). Uzorci su se prethodno zagrijavali 24 sata na temperaturu 105°C prije početka ciklusa zagrijavanja na visoke temperature radi odstranjivanja slobodne vode u uzorcima.

### 2.3.1 Postupak režima zagrijavanja i opterećenja uzoraka prema preporuci RILEM-a

U tablici 2. je pregled osnovnih parametara ispitivanja koji je preporučio RILEM ovisno o tipu ispitivanja.

Tablica 2. Parametri režima zagrijavanja i opterećenja uzoraka prema RILEM

Vrsta parametra	Tlak	Vlak	Modul
Stupanj zagrijavanja i hlađenja uzorka ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	$\leq 2$	$\leq 1,25$	$\leq 2,5$
Stupanj nanošenja opterećenja ( $\text{MPa}/\text{s}$ )	$0,5 \pm 0,1$	0,04	$0,5 \pm 0,1$
Vrijeme držanja uzorka na konst. temp. (min)	$60 \pm 5$	$60 \pm 5$	$60 \pm 5$



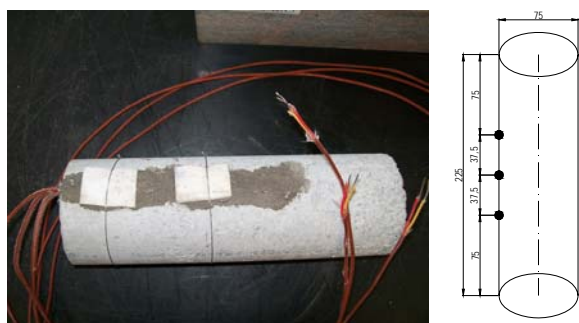
Slika 2. Prikaz ciklusa zagrijavanja uzorka

Usvojena eksperimentalna procedura zahtijeva da se ispitivanje obavlja u serijama od najmanje 3 uzorka te da se na jednom referentnom uzorku na površini bilježi

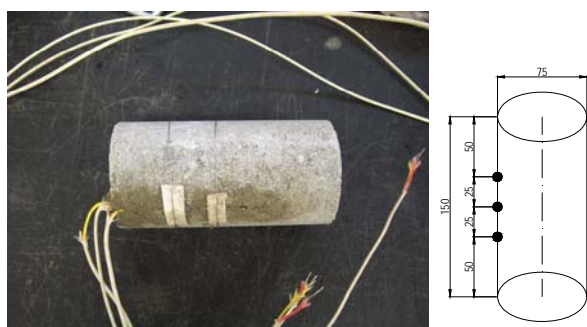
porast temperature u vremenu s unaprijed definiranim maksimalnim temperaturnim gradijentom koji promjena temperature na površini uzorka ne smije premašiti (tablica 2.). Na slici 2. prikazan je ciklus zagrijavanja uzorka s karakterističnim parametrima.

### 2.3.2 Mjerenje temperature u uzorcima

Pri zagrijavanju i hlađenju uzoraka mjerile su se temperature na površini uzorka u trima točkama (slike 3. i 4.). Uzorak koji služi za temperaturna mjerenja naknadno je obrađen i u njega je urezan uzdužni kanal dubine 5 mm u koji se postavljaju termoparovi. Termoparovi se vezuju za površinu betona vatrootalnim epoksidnim ljepilom. Upotrijebljeni termoparovi su tipa K (NiCr – Ni) s debljinom žice 0,7 mm. Temperatura uzorka određena je kao srednja vrijednost temperaturnih mjerenja u tri točke uzorka. Prirast temperature na površini uzorka kontrolira se u vremenskom intervalu od jedne minute.



Slika 3. Položaj mjernih točaka na uzorku za određivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti



Slika 4. Položaj mjernih točaka na uzorku za određivanje vlačne čvrstoće

Brzina zagrijavanja i hlađenja uzorka dodatno je ograničena maksimalno dopuštenom temperaturnom razlikom između triju mjernih točaka uzorka. Maksimalno dopuštene temperaturne razlike za ispitivanje modula elastičnosti, tlačne i vlačne čvrstoće navedene su u tablici 3.

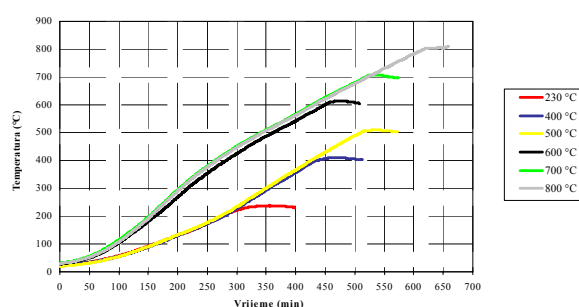
Nakon dostizanja ciljane temperature uzorak se jedan sat drži na toj temperaturi nakon čega prestaje ciklus zagrijavanja te se uzorak ostavlja u peći gdje se hladi zajedno s komorom. Hlađenje uzorka u komori ovisi o

maksimalnoj temperaturi na koju se uzorak zagrijava, s ukupnim trajanjem od 12 do 16 sati.

Tablica 3. Dopuštene temperaturne razlike u mjernim točkama uzorka

$\Delta T_{\max}$ (°C)		Temp. uzorka (°C)
Tlak i modul	Vlak	
1	1	20
10	5	100
20	20	750

Na slici 5. prikazane su dobivene temperature na površini uzorka za pojedinu razinu zagrijavanja uzorka – ispitivanje tlačne čvrstoće.



Slika 5. Prikaz prosječnih temperatura u uzorcima za određivanje tlačne čvrstoće

### 2.4 Eksperimentalno određivanje tlačne čvrstoće uzorka i dijagrama naprezanje-deformacija

Tlačna čvrstoća uzorka određena je postupkom koji je definirao RILEM [13]; pritom su se parametri nanošenja opterećenja na uzorak i brzine zagrijavanja uzorka rabili prema tablici 2. Nakon hlađenja na sobnu temperaturu (inicijalno hlađenje) uzorak se ispituje u preši. Tijekom nanošenja opterećenja na uzorak bilježi se prirast sile na uzorak u vremenu kao i pomak čelične ploče preše u vremenu (LVDT uređaj na ploči preše) (slika 6.).



Slika 6. LVDT uređaj na preši za mjerenje pomaka čelične ploče preše

Omjer sile u preši i ploštine uzorka predstavlja naprezanje u uzorku, a pomak preše podijeljen s duljinom uzorka predstavlja relativnu uzdužnu deformaciju. Iz naprezanja u uzorku i relativne uzdužne deformacije u istom trenutku ispitivanja može se konstruirati dijagram naprezanje-deformacija uzorka.

### 2.5 Eksperimentalno određivanje vlačne čvrstoće uzoraka

Vlačna čvrstoća uzoraka određena je cijepanjem uzorka po izvodnici [9] (slika 7.). Uzorci se zagrijavaju po strožem kriteriju maksimalno dopuštenoga temperaturnoga gradijenta prema tablici 2.



Slika 7. Prikaz uzorka s uloškom za cijepanje

Nakon hlađenja na sobnu temperaturu uzorak se postavlja u prešu s posebnim uloškom s kojim se uzorak opterećuje poprečno po izvodnici. Pri ispitivanju bilježi se vrijednost maksimalne sile pri kojoj dolazi do cijepanja uzorka te se računa vlačna čvrstoća na temelju sljedećeg izraza:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (1)$$

gdje je:

$f_{ct}$  – vlačna čvrstoća uzorka (N/mm<sup>2</sup>)

$F$  – sila pri kojoj dolazi do sloma uzorka (N)

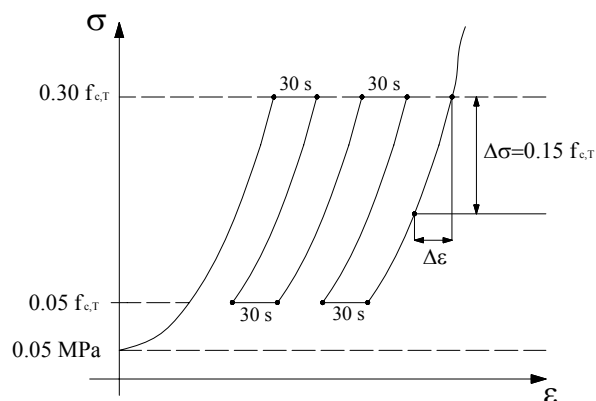
$L$  – duljina uzorka (mm)

$d$  – promjer uzorka (mm).

### 2.6 Eksperimentalno određivanje sekantnog modula elastičnosti uzoraka

Postupak ispitivanja provodi se prema preporuci RILEM-a [14]. Uzorci se nakon procesa zagrijavanja i hlađenja, koji je istovjetan onome za određivanje tlačne čvrstoće,

postavljaju u prešu i opterećuju cikličkim opterećenjem kako je prikazano na slici 8.



Slika 8. Shema opterećenja uzorka za određivanje sekantnog modula elastičnosti

Pri opterećivanju uzorka prati se relativni pomak  $\Delta l$  između dviju točaka uzorka koje se nalaze na međusobnoj udaljenosti  $l$  (smještene u trećinama visine uzorka) i to na dva mjerna mjesta.

Sekantni modul određuje se izrazom:

$$E_{sc} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2)$$

gdje je:

$$\Delta\sigma = 0.15 f_{c,T},$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon|_{0.3 f_{c,T}} - \varepsilon|_{0.15 f_{c,T}},$$

$f_{c,T}$  – rezidualna tlačna čvrstoća uzorka na temperaturi  $T$  (MPa).



Slika 9. Uzorak s postavljenim ekstenziometrima za mjerenje relativnog pomaka

2.7 Eksperimentalno određivanje dinamičkog modula elastičnosti uzoraka

Dinamički modul elastičnosti određuje se ultrazvučnom metodom tako da se kroz uzorak puštaju ultrazvučni valovi (slika 10.), nakon čega se na uređaju očitava vrijeme prolaska valova kroz uzorak. Iz vremena prolaska ultrazvuka kroz uzorak računa se brzina prolaza valova, a nakon toga se dinamički modul određuje se izrazom:

$$E_c = \frac{v^2 \rho (1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{(1 - \mu_d)} \quad (3)$$

gdje je:

$v$  – brzina ultrazvuka (m/s)

$\rho$  – gustoća uzorka (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu_d$  – Poissonov koeficijent.



Slika 10. Uzorak s uređajem za mjerenje dinamičkog modula elastičnosti

3 Rezultati određivanja preostalih mehaničkih svojstava

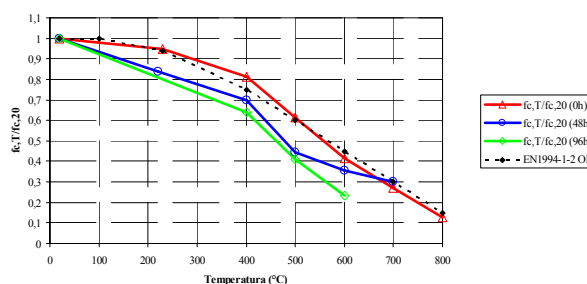
Rezultati su u bezdimenzionalnom obliku tako da se čvrstoća  $f_{i,T}$  za temperaturu  $T$  podijeli s referentnom čvrstoćom uzorka na sobnoj temperaturi  $f_{b,20}$ , gdje je indeks  $i$  oznaka pojedine čvrstoće. Rezultati se odnose na trenutak inicijalnog hlađenja uzorka (0 sati), te 48, 72 i 96 sati nakon inicijalnog hlađenja uzorka. Rezultati određivanja mehaničkih svojstava za svaku temperaturnu razinu dobiveni su kao srednja vrijednost pojedine karakteristike od tri ispitna uzorka. U tablici 4. dane su vrijed-

Tablica 4. Vrijednost mehaničkih svojstava ispitne mješavine betona na sobnoj temperaturi

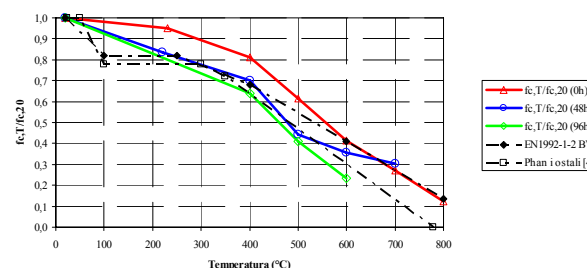
Vrsta parametra (Mpa)	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Srednja vr.	Stand. Dev.
Tlačna čvrstoća	63,9	69,3	68,9	67,4	3,0
Vlačna čvrstoća	5,3	4,7	5,2	5,1	0,3
Sekantni modul	37964,0	39684,0	37098,0	38159,0	1354,0
Tangentni modul	41056,0	45842,0	45484,0	44127,0	2666,0

nosti mehaničkih svojstava pri sobnoj temperaturi. U nastavku su opisani rezultati ispitivanja smanjenja tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti za pojedini temperaturni nivo zagrijavanja uzorka kao i usporedbe rezultata s vrijednostima u EN1992-1-2 [5] i EN1994-1-2 [4] za obični beton i beton velike čvrstoće.

Iz rezultata ispitivanja smanjenja tlačne čvrstoće i iz usporedbe s vrijednostima u eurokodu (slike 11. i 12.), očito



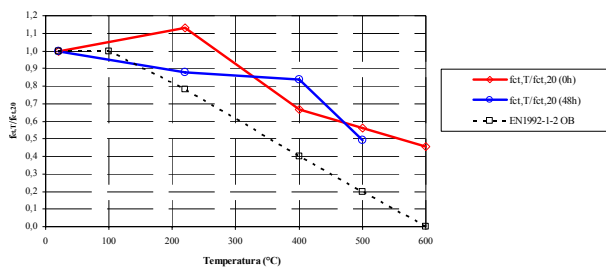
Slika 11. Smanjenje tlačne čvrstoće u vremenu i usporedba s EN1994-1-2: BSC



Slika 12. Smanjenje tlačne čvrstoće u vremenu i usporedba s EN1992-1-2: BVČ

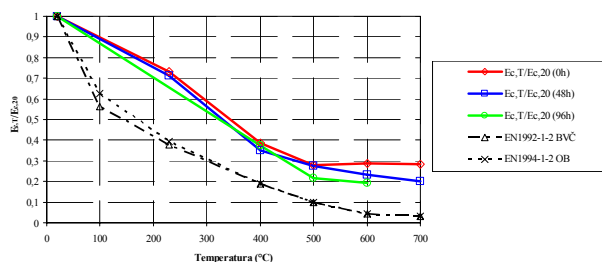
je da se trend smanjenja tlačne čvrstoće ispitivane mješavine slaže s trendom smanjenja koji je karakterističan za običan beton, to više što dijagram smanjenja tlačne čvrstoće nema izraženu razinu (100-300° C) na kojoj nema smanjenja tlačne čvrstoće, generalno karakterističan za betone velikih čvrstoća. Nadalje, rezultati ispitivanja preostale tlačne čvrstoće neposredno nakon hlađenja poklapaju se s dijagramima smanjenje koje predlaže EN1992 za obične betone. Rezultati ispitivanja smanjenje tlačne čvrstoće 48 i 96 sati nakon inicijalnog hlađenja ne poklapaju se s predloškom EN1992 i približno su jednaki dijagramima smanjenja koji su predloženi kao novi model za smanjenje tlačne čvrstoće betona velikih čvrstoća [12].

Na slici 13. prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za trenutak inicijalnog hlađenja uzorka (0 sati) i 48 sati nakon inicijalnog hlađenja te usporedba s modelom smanjenja u EN1992-1-2.



Slika 13. Smanjenje vlačne čvrstoće  $f_{ct}$  u vremenu i usporedba s EN1992-1-2: BSČ

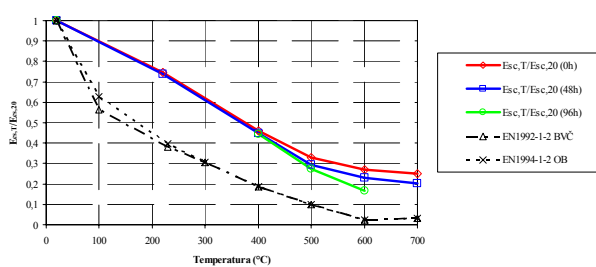
Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće pokazuju povećanje vlačne čvrstoće u temperaturnom području oko 200 °C, a to upućuje na mogući porast energije sloma betona pri zagrijavanju pa stoga i veće vlačne čvrstoće uzorka. Model smanjenja vlačne čvrstoće predložen prema EN1992 ne poklapa se s dobivenim rezultatima i daje rezultate koji su na strani sigurnosti. Velika odstupanja mogla bi se objasniti ako je poznat točan ispitni postupak po kojem su određeni dijagrami smanjenja vlačne čvrstoće prema EN1992 (određivanje čvrstoće cijepanjem, savijanjem ili čisti vlačni test).



Slika 14. Redukcija tangentnog modula elastičnosti  $E_c$  u vremenu i usporedba s EN1992-1-2 i EN1994-1-2: BSČ i BVČ

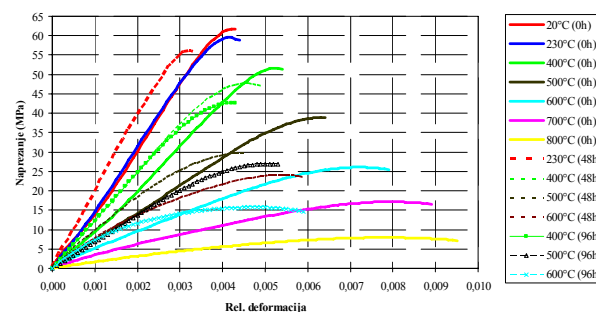
Rezultati ispitivanja smanjenja tangentnog modula elastičnosti (slika 14.) pokazuju naglu redukciju modula elastičnosti, a to je u skladu s činjenicom da temperatura ima jači utjecaj na elastično ponašanje materijala negoli na njegovo krajnje granično stanje sloma (definirano tlačnom čvrstoćom). Iz dijagrama se vidi i veliko odstupanje rezultata ispitivanja tangentnog modula u odnosu na vrijednosti koje su dane u EN1992-1-2 i EN1992-1-4. Razlog tolikog odstupanja jest što krivulje naprezanje-deformacija prema eurokodu sadrže i dodatne deformacije koje se pojavljuju pri djelovanju visokih temperatura u betonu (deformacija puzanja i prolazna deformacija) koje smanjuju tangentni i sekantni modul elastičnosti i u ishodištu i na cijeloj krivulji naprezanje-deformacija.

Rezultati ispitivanja sekantnog modula elastičnosti (slika 15.) u smislu trenda ponašanja jako su slični rezultatima ispitivanja tangentnog modula elastičnosti te su rezultati ispitivanja tangentnog modula otprilike 15-20 % veći od rezultata ispitivanja sekantnog modula.



Slika 15. Smanjenje sekantnog modula elastičnosti  $E_{sc}$  u vremenu i usporedba s EN1992-1-2 i EN1994-1-2: BSČ i BVČ

Dijagrami naprezanje-deformacija dobiveni su uprosječenjem vrijednosti naprezanja za istu deformaciju na tri ispitivana uzorka. Prikaz rezultata za vremenski interval od 0 do 96 sati nakon inicijalnog hlađenja nalazi se na slici 16.

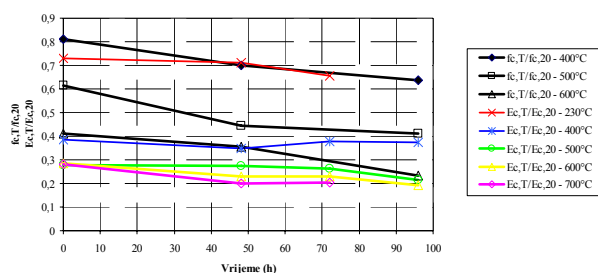


Slika 16. Dijagrami naprezanje-deformacija uzoraka za različite razine temperature u ovisnosti o vremenu

Dijagrami naprezanje-deformacija uzoraka dobivenih pri određivanju tlačne čvrstoće uzorka pokazuju izraženo povećanje granične deformacije pri slomu, a to je u skladu s rezultatima drugih istraživača. Dijagrami naprezanje-deformacija (slika 16.) pokazuju, kao druga preostala svojstva, promjenjivost u vremenu, s povećanjem tangentnog modula elastičnosti, što nije u skladu s eksperimentalno određenim vrijednostima dvaju modula. Naime, iz dijagrama naprezanje-deformacija za temperature razine 230 i 400°C, 48 i 96 sati nakon inicijalnog hlađenja vidi se, povećanje tangentnog modula što nije u skladu s dijagramom smanjenja tangentnog modula na slici 14. Povećanje tangentnog modula uzrokovano je umjetnim putem zato što je na uzorcima, prije nego što im je određena tlačna čvrstoća, primijenjen postupak određivanja sekantnog modula elastičnosti, pri čemu je uzorak opterećen između 5 i 30 % vrijednosti tlačne čvrstoće pri promatranoj temperaturi koja uzrokuje zbijanje uzoraka.

Promjena tangentnog modula i tlačne čvrstoće u intervalu od 0 do 96 sati nakon inicijalnog hlađenja uzoraka prikazana je na slici 17. Vidljiva je izrazita varijabilnost tlačne čvrstoće od oko 20 % za kratki vremenski interval, dok je variranje tangentnog modula u granicama do 10 %. Također, iz dijagrama se vidi da krivulje vremen-

skog smanjenja za pojedine karakteristike imaju različit stupanj opadanja za pojedinu temperaturnu razinu.



Slika 17. Smanjenje tlačne čvrstoće i tangentnog modula u vremenu nakon inicijalnog hlađenja

#### 4 Analiza dobivenih rezultata

S gledišta vremenskih promjena preostalih svojstava, najveće se promjene događaju kod tlačne čvrstoće koja se u kratkom vremenskom intervalu reducira i do 20 % što nije u skladu s rezultatima drugih istraživača [7] koja pokazuju da se tolika razina smanjenja pojavljuje u puno duljem vremenskom intervalu (minimalno 15 dana nakon inicijalnog hlađenja). Ta činjenica pridonosi općenitom zaključku da se navedeni beton, iako prethodno klasificiran kao beton visoke čvrstoće, zbog izlaganja visokim temperaturama ponaša kao obični beton (OB doživljava minimum redukcije mnogo prije nego BVC). Također, iz dijagrama smanjenja tlačne čvrstoće vidi se da se unutar intervala od 96 sati pojavljuje znatno smanjenje trenda opadanja tlačne čvrstoće, a to može značiti da smanjenje tlačne čvrstoće za ovu mješavinu betona dostiže svoj minimum mnogo prije nego što je opaženo kod drugih istraživača.

Rezultati redukcije vlačne čvrstoće u vremenu upućuju na to da će i vlačna čvrstoća pokazati trend smanjenja prethodno opažen kod tlačne čvrstoće, iako nije dostupan dovoljan broj rezultata smanjenja vlačne čvrstoće u vremenu da bi se mogao donijeti siguran zaključak o konačnom smanjenju ili o općenitom ponašanju trenda smanjenja vlačne čvrstoće.

Veličina smanjenja tangentnog i sekantnog modula u vremenu pokazuje da se obje veličine zanemarivo mije-

njaju tokom vremena, a to pokazuje da isti parametri koji utječu na smanjenje tlačne čvrstoće pri visokim temperaturama utječu i na smanjenje modula elastičnosti, međutim, nakon hlađenja, kemijski procesi, kao što je parcijalna rehidratacija cementne paste, imaju veći utjecaj na smanjenje tlačne čvrstoće nego što je to slučaj kod modula elastičnosti – čija je veličina smanjenja direktno određena veličinom temperaturnog oštećenja (ekspanzije) betona.

S obzirom na provedena istraživanja, buduća ispitivanja odnosit će se na određivanje preostalih svojstava na uzorcima starosti od 1-2 mjeseca (mjereno od trenutka inicijalnog hlađenja). Dodatna istraživanja potrebna su da bi se odredio minimum vrijednosti preostalih svojstava kao i njihova konačna vrijednost. Rezultati bi u konačnici dali kompletan uvid u mehaničko ponašanje betona nakon djelovanja požara.

#### 5 Zaključak

Rezultati smanjenja preostalih mehaničkih svojstava dobivenih ispitivanjem navedene mješavine betona pokazuju izrazitu promjenjivost u kratkom vremenskom intervalu (96 sati) posebno za tlačnu čvrstoću betona, dok modul elastičnosti ne pokazuje značajniju promjenjivost u navedenom intervalu. Analizom trenda ponašanja pojedinih mehaničkih svojstava utvrđeno je da ispitivani beton, iako prethodno klasificiran kao beton visokih čvrstoća, pokazuje karakter ponašanja na visokim temperaturama specifičan za običan beton – što je u konačnici pozitivan podatak zato što betoni velikih čvrstoća pokazuju smanjenje mehaničkih svojstava višeg reda u odnosu na obični beton. Razlog je u činjenici što promatrana mješavina betona nema klasičnih dodataka koji su karakteristični za beton velikih čvrstoća, a razlog je dobivanja velike tlačne čvrstoće na sobnoj temperaturi u niskoj vrijednosti vodocementnog omjera. S obzirom na dosad provedena istraživanja smanjenja mehaničkih svojstava u vremenu, planiraju se provesti opsežnija istraživanja određivanja mehaničkih karakteristika na duži vremenski interval, kao i njihovo određivanje dok je uzorak betona u vrućem stanju, što bi odgovaralo ispitivanju mehaničkih svojstava betona u trenutku djelovanja požara.

#### Zahvale

- Ispitivanja opisana u ovome članku provedena su u sklopu znanstvenog projekta br. 083-1465 "Pouzdanost konstrukcija i procjena rizika uslijed ekstremnih djelovanja" koje podupire Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.
- Istraživanja su provedena u laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu 2010. godine.

Autori se zahvaljuju na pomoći i suradnji.



## LITERATURA

- [1] Bamonte, P.; Gambarova, P. G.; Meda, A.: *Today's Concretes Exposed to Fire – Test Results and Sectional Analysis*, Structural Concrete, V.09, (2008), No.1, 19-29.
- [2] Boko, I.; Peroš, B.: *Sigurnost nosivih čeličnih konstrukcija pri djelovanju požara*, Građevinar 54, (2002), 11, 643-656.
- [3] Boko, I.; Peroš, B.; Torić, N.: *Pouzdanost čeličnih konstrukcija u požaru*, Građevinar 62, (2010), 5, 389-400.
- [4] EN 1992-1-2:2004, Eurocode 2 - *Design of Concrete Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design*, European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- [5] EN 1994-1-2:2005, Eurocode 4 – *Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- [6] Feliceti, R.; Gambarova, P. G.: *Effects of High Temperature on the Residual Compressive Strength of High-Strength Siliceous Concretes*, ACI-Materials Journal, Vol.95, (1998) No.4, 395-406.
- [7] Feliceti, R.; Gambarova, P. G.: *Expertise and Assessment of Materials and Structures After Fire*, FIB bulletin 46: Fire Design of Concrete Structures – Structural Behaviour and Assessment, (2008), 63-114.
- [8] Fu, Y. F.; Wong, Y. L.; Poon, C. S.; Tang, C. A.: *Stress-Strain Behaviour of High Strength Concrete at Elevated Temperatures*, Magazine of Concrete Resesarch, Vol. 57, (2005), 9, 535-544.
- [9] HRN EN 12390-6, *Ispitivanje očvrsllog betona – 6. dio: Vlačna čvrstoća cijepanjem uzoraka* (EN 12390-6:2000), 2001.
- [10] Husem, M.: *The Effects of High Temperature on Compressive and Flexural Strengths of Ordinary and High-performance Concrete*, Fire Safety Journal, Vol. 41, (2006), 155-163.
- [11] Neville, A. M.: *Properties of Concrete*, Longman Scientific&Tehcnical, 1995.
- [12] Phan, L. T.; Carino, N. J.: *Code Provisions for High Strength Concrete Strength – Temperature Relationship at Elevated Temperatures*, Materials and Structures, Vol 36., (2003), 91-98.
- [13] RILEM 129-MHT *Test Method, Compressive Strength for Service and Accidental Conditions*, Materials and structures, Vo.28, (1995), 410-414.
- [14] RILEM 129-MHT *Test Method, Modulus of Elasticity for Service and Accident Conditions*, Materials and structures, Vo.37, (2004), 139-144.