

Primljen / Received: 13.12.2011.

Ispravljen / Corrected: 9.5.2012.

Prihvaćen / Accepted: 28.8.2012.

Dostupno online / Available online: 15.9.2012.

Analiza otpornosti čeličnih konstrukcija u požaru

Autori:

Prof.dr.sc. **Ivica Boko**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

ivica.boko@gradst.hr

Neno Torić, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

neno.toric@gradst.hrProf.dr.sc. **Bernardin Peroš**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

bernardin.peros@gradst.hr

Prethodno priopćenje

[Ivica Boko, Neno Torić, Bernardin Peroš](#)

Analiza otpornosti čeličnih konstrukcija u požaru

U radu je dan prikaz eksperimentalnih istraživanja koja su provedena u svrhu ispitivanja jednostavnih proračunskih modela koji su propisani u normi HRN EN 1993-1-2:2008 za određivanje otpornosti čeličnih konstrukcija izloženih požaru. Analiza je provedena za osnovne parametre smanjenja mehaničkih svojstava čelika na visokim temperaturama te za osnovne modele za proračun požarne otpornosti elemenata izloženih djelovanju poprečnog opterećenja, te poprečnog i uzdužnog opterećenja (savijanje i savijanje s uzdužnom silom).

Ključne riječi:

provođenje topline, požar, mehanička svojstva, čelik, savijanje s uzdužnom silom, savijanje

Preliminary note

[Ivica Boko, Neno Torić, Bernardin Peroš](#)

Fire resistance analysis of steel structures

Experimental studies conducted to test simple computation models for the determination of resistance of steel structures exposed to fire, as defined in HRN EN 1993-1-2:2008, are presented in the paper. The analysis is made for basic parameters defining reduction of mechanical properties of steel at elevated temperatures, and for basic models for calculating fire resistance of elements subjected to cross-sectional load, and transverse and longitudinal load (bending and bending with longitudinal force).

Key words:

heat transfer, fire, mechanical properties, steel, longitudinal force bending, bending

Vorherige Mitteilung

[Ivica Boko, Neno Torić, Bernardin Peroš](#)

Brandwiderstandsanalyse von Stahlkonstruktionen

In der Arbeit ist eine Darstellung der experimentellen Forschungen dargestellt, die zum Zwecke der Forschung einfacher Berechnungsmodelle, die nach Norm HRN EN 1993-1-2:2008 zum Zwecke der Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Stahlkonstruktionen im Falle eines Brandes vorgeschrieben sind aufgezeigt. Die Analyse wurde für grundlegende Parameter der Senkung mechanischer Eigenschaften von Stahl bei hohen Temperaturen sowie für Grundmodelle zur Berechnung des Brandwiderstandes von Elementen, die der Wirkung von Querbelastungen sowie Quer- und Längsbelastung (Biegung und Biegung mit Längskraft) ausgesetzt sind durchgeführt.

Schlüsselwörter:

Wärmeleitung, Brand, mechanische Eigenschaften, Stahl, Biegung mit Längskraft, Biegung

1. Uvod

Inženjerske metode proračuna otpornosti čeličnih konstrukcija uslijed djelovanja požara doživjele su procvat posljednjih dvadeset godina, čijem su ubrzanom razvoju uvelike doprinijele i suvremene europske norme – konstrukcijski Eurokodovi. Požarna otpornost čeličnih elemenata, u okviru europskih normi, dobiva se primjenom propisanih pravila ili složenih metoda određivanja požarne otpornosti konstrukcija. Propisana pravila utemeljena su na jedinstvenoj reprezentaciji požarnog djelovanja u obliku standardne krivulje požara i korištenju tabličnih podataka za određivanje požarne otpornosti konstrukcije, dok su složene metode bazirane na određivanju požarne otpornosti korištenjem modela razvoja požara i modela provođenja topline radi dobivanja realnih požarnih temperatura u čeličnoj konstrukciji. Uz to, propisana pravila i složene metode određivanja požarne otpornosti čeličnih konstrukcija oslanjaju se na korištenje jednostavnih i složenih proračunskih modela za određivanje otpornosti čeličnih konstrukcija. Parametri koji određuju kolika je otpornost konstrukcije na visokim temperaturama mogu se podijeliti u dvije skupine:

- parametri smanjenja mehaničkih svojstava materijala uslijed djelovanja požarnih temperatura (granica popuštanja, granica proporcionalnosti i modul elastičnosti);
- parametri koji služe kao osnovni podaci za korištenje jednostavnih proračunskih modela otpornosti konstrukcija (faktori koji uzimaju u obzir izvijanje i bočno - torzijsko izvijanje te razdiobu temperature po elementu i presjeku).

S obzirom na broj različitih vrsta čelika koji se trenutačno koriste u građevinarstvu, postoje određena odstupanja eksperimentalno određenih parametara mehaničkih svojstava u odnosu na one koji su dani u normi HRN EN1993-1-2:2008. Odstupanja su, prema literaturi, posebno izražena kod parametara mehaničkih svojstava čelika te krivulja naprezanje-deformacija na visokim temperaturama [1].

Ispitivanje jednostavnih proračunskih modela otpornosti elemenata izloženih visokim temperaturama danih u HRN EN1993-1-2:2008 za elemente izložene djelovanju požara česta je tema znanstvenih istraživanja [2-5], što upućuje na kompleksnost ponašanja konstrukcija u požaru čak i u slučaju konstrukcije jednostavnog statičkog sustava, kad se konstrukcija sastoji od samo jednog elementa. Razlozi odstupanja požarne otpornosti konstrukcija prema proračunskom modelu u odnosu na rezultate eksperimenata jesu preveliko pojednostavljenje ponašanja čelika kao materijala u požaru s idealnim elastoplastičnim modelom materijala [6], kao i moguća odstupanja parametara koji su svojstveni materijalu za proračun uvećanja temperatura u elementu te za proračun otpornosti. S obzirom na navedeno, nameće se potreba kvantificiranja veličine odstupanja predviđene požarne otpornosti normiranim inženjerskim metodama u odnosu na stvarno ponašanje, te stvaranje novih

smjernica koje bi uzele u obzir postojeća odstupanja i koje bi se ugradile u postojeće norme za projektiranje i proračun čeličnih konstrukcija izloženih djelovanju požara.

Svrha ovog rada jest analiza i usporedba osnovnih parametara koji opisuju smanjenje mehaničkih svojstava materijala i proračunskih modela za nosivost grednih elemenata izloženih djelovanju požara s četiri strane, predloženih prema normi HRN EN1993-1-2:2008 [7] s provedenim eksperimentalnim istraživanjima.

Provedeno eksperimentalno istraživanje [8] uključuje određivanje mehaničkih svojstava proizvodne serije čelika kvalitete S355 primjenom stacionarne metode zagrijavanja (zagrijavanje na unaprijed određenu temperaturu, a potom opterećivanje uzorka konstantnom brzinom unosa deformacije u uzorak) i nestacionarne metode zagrijavanja (prethodno opterećivanje uzorka na određeni nivo naprezanja, te naknadnim zagrijavanjem konstantnim prirastom temperature) i određivanje požarne otpornosti (nosivosti) elemenata koji su grijani stacionarnom i nestacionarnom metodom zagrijavanja te opterećeni poprečnim opterećenjem s i bez uzdužnog opterećenja.

U radu je također dan prikaz metodologije ispitivanja koja je primijenjena u navedenim eksperimentalnim istraživanjima da bi se pokazala dosljednost studije s ispitnim metodama koje su primijenjene za dobivanje osnovnih parametara potrebnih za opisivanje ponašanja konstrukcija u požaru prema normi HRN EN1993-1-2:2008.

Analiza navedenih parametara i modela proračuna otpornosti čeličnih konstrukcija provedena je u dva dijela:

- usporedba vrijednosti mehaničkih svojstava čelika na visokim temperaturama danih u HRN EN1993-1-2:2008 s provedenim eksperimentalnim istraživanjima određivanja mehaničkih svojstava proizvodne serije čelika S355 na visokim temperaturama,
- usporedba rezultata dobivenih jednostavnim proračunskim modelima za granično stanje nosivosti elementa i granično stanje uporabljivosti (pomaka) za elemente opterećene poprečnim i uzdužnim opterećenjem s pripadajućim eksperimentalnim rezultatima.

2. Prethodna istraživanja

U ovom poglavlju dan je pregled eksperimentalnih i teoretskih istraživanja vezanih za određivanje mehaničkih svojstava čelika i otpornosti čeličnih elemenata na visokim temperaturama koja su korištena za izradu norme HRN EN 1993-1-2:2008.

2.1. Mehanička svojstva čelika na visokim temperaturama

Mehanička svojstva materijala pri djelovanju visokih temperatura prema normi HRN EN1993-1-2:2008 određena su na temelju istraživanja koje je proveo Schleich [9]. To je

istraživanje koncipirano na ispitivanju slobodno oslonjenih grednih elemenata opterećenih na savijanje koji su izloženi djelovanju koncentrirane sile u polovini raspona i zagrijavani s linearnim uvećanjem temperature u peći od 3,5 °C/min (nestacionarno ispitivanje). Redukcijski koeficijenti za granicu popuštanja čelika određeni su na temelju jednakosti između omjera granice popuštanja pri visokim temperaturama i granice popuštanja pri atmosferskim temperaturama, i omjera sile loma za gredni element pri visokim temperaturama i sile loma za gredni element pri atmosferskim temperaturama. Kratki elementi su opterećivani sve do konačnog formiranja plastičnog zgloba u sredini elementa, bez mogućnosti pojave bočnog - torzijskog izvijanja elementa. Osim što su kvalitativno određeni redukcijski koeficijenti za mehanička svojstva čelika, u istraživanju je pokazano da se otpornost slobodno oslonjenih grednih elemenata može iskazati u ovisnosti o koeficijentu smanjenja granice popuštanja.

2.2. Krivulje naprezanje-deformacija

Za potrebe numeričkog modeliranja ponašanja konstrukcija u požaru definira se skup temperaturno ovisnih krivulja naprezanje-deformacija koje se mogu odrediti stacionarnom i nestacionarnom metodom zagrijavanja. Krivulje naprezanje-deformacija iz norme HRN EN1993-1-2:2008 usvojene su prema istraživanjima koja su proveli Kirby i drugi [10], kao i niz drugih istraživača [11, 12]. Krivulje se sastoje od lineranog dijela do granice proporcionalnosti čelika, eliptičnog dijela do granice popuštanja čelika (naprezanje pri 2 % deformacije) kojom se definira kraj elastičnog ponašanja materijala. Nakon eliptičnog dijela, dijagram je definiran platoom tečenja (idealno plastični model) u kombinaciji s modelom očvršćivanja čelika koji je definiran do temperature 400°C. Prema [13], pri malim vrijednostima deformacija, mehanička svojstva dobivena nestacionarnom metodom zagrijavanja su na strani sigurnosti za razliku od mehaničkih svojstava dobivenih stacionarnom metodom zagrijavanja.

2.3. Jednostavni proračunski modeli požarne otpornosti čeličnih konstrukcija

Jednostavni proračunski modeli otpornosti elemenata izloženih požaru definirani su u tri različita područja: u području vremena, području čvrstoće i području temperature [14]. Koncept jednostavnih proračunskih modela otpornosti elemenata uslijed djelovanja požara prema normi HRN EN1993-1-2:2008 stvoren je analiziranjem eksperimentalnih i teoretskih istraživanja [10, 15], s tim da je proračun otpornosti prilagođen normiranom proračunu otpornosti elemenata na atmosferskoj temperaturi. Istraživanje koje su proveli Kirby i drugi odnosi se na nezaštićene vruće valjane čelične I-elemente i kompozitne elemente s različitim tipovima rubnih uvjeta oslanjanja na krajevima. U provedenom su eksperimentu gredni elementi i stupovi bili izloženi djelovanju požara definiranog standardnom krivuljom s tri i s četiri

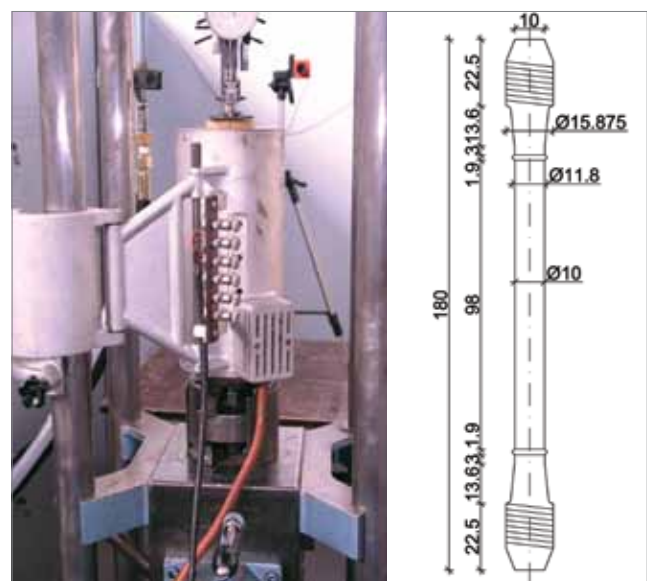
strane, s opterećenjem od betonske ploče i koncentriranih sila raspodijeljenih po dužini elementa. U istraživanju je pokazana ovisnost požarne otpornosti čeličnih elemenata o rubnim uvjetima oslanjanja, faktoru oblika poprečnog presjeka te obliku temperaturnog polja u presjeku čeličnog elementa.

3. Analiza mehaničkih svojstava čelika na visokim temperaturama

U ovom poglavlju dan je prikaz određivanja mehaničkih svojstava proizvodne serije građevinskog čelika primjenom stacionarne i nestacionarne metode zagrijavanja [8], krivulja naprezanje-deformacija na visokim temperaturama i temperatura-deformacija te usporedba s modelima iz norme HRN EN1993-1-2:2008.

3.1. Prikaz eksperimenta

Mehanička svojstva čelika na visokim temperaturama određena su eksperimentalno primjenom stacionarne i nestacionarne metode zagrijavanja u Laboratoriju zavoda za čelične konstrukcije Instituta IGH, Poslovni centar Zagreb. Primjenom vlačnih ispitivanja korištene su standardne epruvete kod kojih je odnos $L_0/d_0 = 10$, gdje je L_0 mjerna dužina, a d_0 promjer epruvete (ispitnog uzorka). Stacionarnom i nestacionarnom metodom zagrijavali su se uzorci u serijama od dvije epruvete za pojedinu temperaturnu razinu. Primjenom nestacionarne metode epruveta se grijala brzinom zagrijavanja 10 °C/min s prethodno unesenim naprezanjem u epruvetu, dok je primjenom stacionarne metode epruveta opterećivana brzinom prirasta deformacije 0,02 %/s, s prethodnim grijanjem epruvete na određenu temperaturu. Na slici 1. prikazane su dimenzije vlačne epruvete te termokomora u kitalici koja je korištena za zagrijavanje uzoraka.



Slika 1. Prikaz termokomore i ispitnog uzorka (epruvete)

Deformacije ispitnog uzorka mjerene su uz pomoć videoekstenziometra (optičkog uređaja). Taj uređaj radi na principu mjerenja pomaka kontrastnih točaka (crno-bijele točke) dobivenih uz pomoć elemenata izrađenih od specijalnog čelika (nedeformabilnog na visokim temperaturama).

U tablici 1. prikazan je kemijski sastav analiziranog čelika klasificiranog kao S355J2G3 po standardu EN10025:1990+A1:1993, koji je utvrđen od strane proizvođača "Astron" - Luxembourg. Rezultati određivanja mehaničkih svojstava analiziranog čelika na sobnoj temperaturi prikazani su u tablici 2.

Tablica 1. Kemijski sastav analiziranog čelika (u %)

Kemijski element	Udio [%]	Kemijski element	Udio [%]
Ugljik, C	0,163	Vanadij, V	0,003
Fosfor, P	0,007	Mangan, Mn	1,44
Sumpor, S	0,0012	Molibden, Mo	0,002
Dušik, N	0,0043	Niobij, Nb	0,001
Aluminij, Al	0,031	Nikal, Ni	0,14
Bor, B	0,0002	Silicij, Si	0,220
Krom, Cr	0,19	Titanij, Ti	0,002
Bakar, Cu	0,19		

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika na sobnoj temperaturi

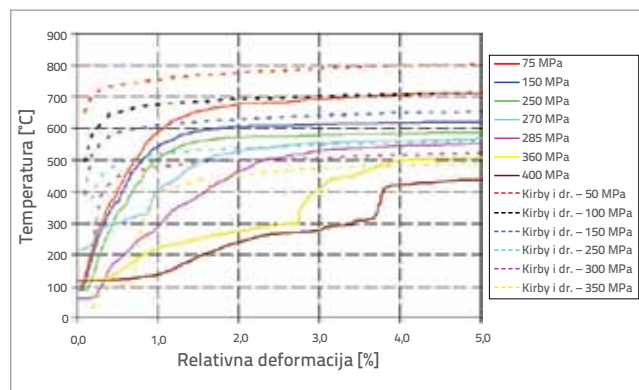
Ispitni uzorak	$f_{y,20}$ [MPa]	$f_{u,20}$ [MPa]	$E_{y,20}$ [MPa]
1	363,3	515,3	208000,0
2	365,4	521,3	216000,0
3	381,2	511,2	197000,0
4	346,8	513,5	219000,0
5	362,6	514,4	201000,0
6	354,9	520,8	213000,0
Sr. vrij. [MPa]	362,4	516,1	209000,0
St. dev. [MPa]	11,5	4,1	8649,0

3.2. Rezultati - nestacionarna metoda zagrijavanja

Rezultati određivanja mehaničkih svojstava primjenom nestacionarne metode zagrijavanja uzoraka, kao i usporedba s eksperimentalnim podacima preuzetim iz [13] za istu kvalitetu čelika i za režim zagrijavanja 10 °C/min, prikazani su na slici 2.

Iz slike 2. vidljivo je da su male razlike u temperaturama kod kojih dolazi do dosezanja granice popuštanja (deformacija od 2 %) između ispitnih čeličnih uzoraka i rezultata koje je dobio Kirby. Veća odstupanja na razini deformacija do 1,5 %

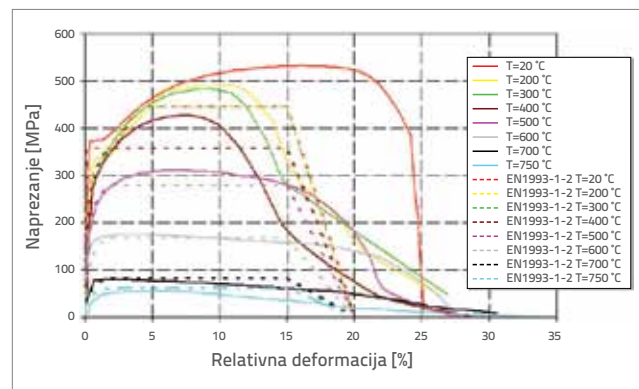
javljuju se zbog utjecaja deformacija od puzanja čelika, koje uvelike ovise o kemijskom sastavu čelika, razini napreznja i ukupnom vremenu držanja uzorka pod opterećenjem. Također značajnija odsupanja na razini deformacija od 2 % javljaju se pri razini napreznja ~ 360 MPa, gdje je utjecaj od puzanja čelika značajan.



Slika 2. Krivulje temperatura-deformacija dobivene nestacionarnom metodom zagrijavanja i usporedba s [13]

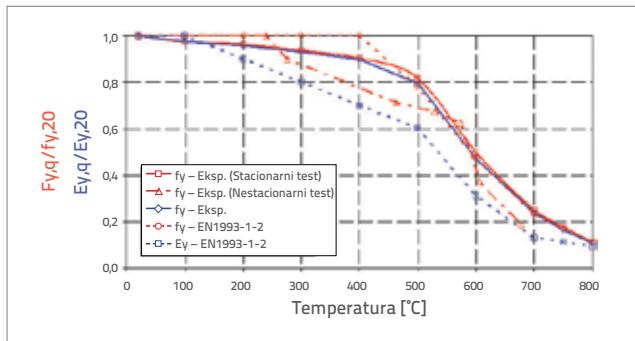
3.3. Rezultati - stacionarna metoda zagrijavanja

Na slici 3. prikazani su dijagrami napreznje-deformacija dobiveni stacionarnom metodom zagrijavanja čeličnih uzoraka.



Slika 3. Krivulje napreznje-deformacija dobivene stacionarnom metodom ispitivanja i usporedba s modelom iz norme HRN EN1993-1-2:2008

Iz slike 3. vidljiva je pojava očvršćivanja ispitivanog čelika do temperature 400 °C, što krivulje iz norme HRN EN1993-1-2:2008 aproksimiraju sa zadovoljavajućom točnošću. Usporedbom platoa tečenja dobivenog ispitivanjem uzoraka s modelom platoa tečenja prema normi HRN EN1993-1-2:2008 vidljiva je zadovoljavajuća aproksimacija koju daje model iz Eurokoda 3. Da bi se bolje uočile promjene pojedinih parametara, na slici 4. prikazane su promjene granice popuštanja i modula elastičnosti za pojedine metode određivanja mehaničkih svojstava čeličnih uzoraka.



Slika 4. Rezultati određivanja granice popuštanja (2 %) i tangentnog modula elastičnosti čelika u usporedbi s normom HRN EN1993-1-2:2008

Iz slike 4. vidljivo je manje odstupanje vrijednosti granice popuštanja dobivene eksperimentom od modela HRN EN1993-1-2:2008 u nižem temperaturnom području. Razlog odstupanja rezultata je taj što su vrijednosti granice popuštanja na visokim temperaturama prema normi HRN EN1993-1-2:2008 određene drukčijom metodom ispitivanja [9] (ispitivanje elemenata), dok su eksperimentalna ispitivanja prikazana u radu provedena na čeličnim epruvetama. Iz rezultata je vidljivo značajnije odstupanje početnog modula elastičnosti u usporedbi s vrijednostima iz norme HRN EN1993-1-2:2008, pogotovo u temperaturnom području 300-600°C. Nestacionarna metoda zagrijavanja uzoraka, koja simulira realni slučaj djelovanja visokih temperatura, daje vrijednosti granice popuštanja koje su općenito na strani sigurnosti u odnosu na vrijednosti dobivene stacionarnom metodom zagrijavanja.

4. Analiza otpornosti jednostavnih proračunskih modela

U ovom poglavlju dan je prikaz programa ispitivanja čeličnih elemenata stacionarnom metodom zagrijavanja, koji su nakon primijenjenog režima zagrijavanja opterećeni poprečnim opterećenjem sa i bez uzdužnog opterećenja. Također, dan je prikaz programa ispitivanja čeličnih elemenata nestacionarnom metodom, koji su trenutno opterećeni poprečnim opterećenjem, nakon čega su

zagrijavani nelinearnim prirastom temperature u peći do otkazivanja nosivosti elementa. U eksperimentu su praćeni vertikalni pomaci na polovini raspona elemenata kao i površinske temperature u pojedinim točkama elementa koje su prikazane u radu [16] (u navedenom radu prikazane su samo temperature za stacionarno ispitivanje savijanja i savijanja s uzdužnom silom). Izvršena je usporedba pomaka na elementima dobivenih ispitivanjem s rezultatima pomaka dobivenih modeliranjem nosača metodom konačnih elemenata u računalnom programu [17] koji može uzeti u obzir geometrijsku nelinearnost konstrukcije, ali ne i nelinearnost materijala koja uključuje puzanje čelika na visokim temperaturama. Dana je usporedba rezultata opterećenja pri lomu elementa dobivenog eksperimentalnim istraživanjem s proračunanim opterećenjem pri lomu dobivenim na temelju proračunske otpornosti čeličnog elementa opterećenog na savijanje i savijanje s uzdužnom silom koja je određena prema preporukama HRN EN1993-1-2:2008.

4.1. Prikaz eksperimenta

Program eksperimenta sastojao se od zagrijavanja čeličnih elemenata statičkog raspona 2,5 m primjenom stacionarne i nestacionarne metode zagrijavanja (slika 5.), uz opterećivanje elemenata različitim tipovima opterećenja (savijanje i savijanje s uzdužnom silom). Prilikom opterećivanja elemenata u sredini raspona osigurano je odgovarajuće bočno pridržanje elementa radi sprječavanja bočnog - torzijskog izvijanja elementa. Eksperiment je u potpunosti proveden u Laboratoriju za toplinska mjerenja (LTM) Zagreb - Lučko. U tablici 3. i 4. dan je prikaz eksperimentalnog programa ispitivanja čeličnih elemenata.

Tablica 4. Prikaz eksperimentalnog programa ispitivanja čeličnih elemenata – nestacionarna metoda

Metoda ispitivanja	Nestacionarna	
Tip opterećenja	Savijanje	
Sila [kN]	200	275
Srednji gradijent zagrijavanja [°C/min]	5	10

Tablica 3. Prikaz eksperimentalnog programa ispitivanja čeličnih elemenata – stacionarna metoda

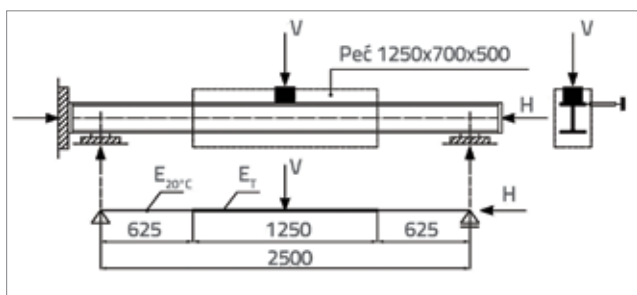
Metoda ispitivanja		Stacionarna						
Tip opterećenja		Savijanje				Ekscentrični tlak		
Maks. temperatura [°C]		400	500	600	700	400	500	600
Režim zagrijavanja		Nelinearan				Nelinearan		
Sila [kN]	Horizontalna	-				400		
	Vertikalna	150-300				150-400		



Slika 5. Prikaz peći s okvirom za unošenje opterećenja u čelični element

4.2. Modeliranje ponašanja čeličnog elementa u požaru metodom konačnih elemenata

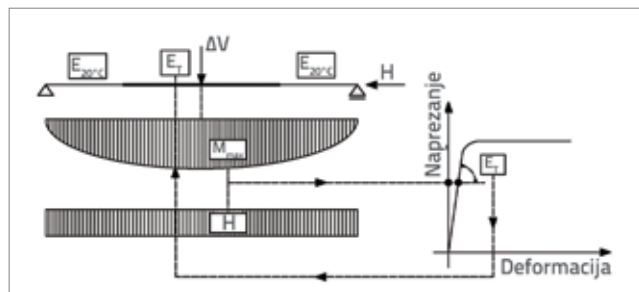
Za predviđanje pomaka elementa opterećenog kao na slici 6. korišten je programski paket SCIA [17] baziran na metodi konačnih elemenata. Element je modeliran s tri konačna elementa, kojem je središnji konačni element zadan sa smanjenim modulom elastičnosti u ovisnosti o razini naprezanja u poprečnom presjeku te veličini ciljane stacionarne temperature u dijelu elementa koji se nalazi unutar peći (400-700°C za ispitivanje savijanja te 400-600°C za ispitivanje savijanja u kombinaciji s uzdužnom silom). Isti model upotrijebljen je za predviđanje pomaka na elementu koji je ispitivan nestacionarnom metodom zagrijavanja na način da se za diskretne vrijednosti razvijenih temperatura u elementu izračunavao pomak u sredini raspona elementa.



Slika 6. Prikaz unošenja opterećenja u element zajedno s proračunskim modelom za savijanje i savijanje s uzdužnom silom

Proračun pomaka primjenom jednostavnog proračunskog modela za slučaj stacionarnog zagrijavanja proveden je na sljedeći način: vertikalna sila u modelu nanosi se inkrementalno u koracima od 20 kN na temelju koje se računa moment vanjske sile. Iz momenta vanjske sile računa se maksimalno naprezanje u rubnom vlakancu. Na temelju vrijednosti maksimalnog naprezanja u rubnom vlakancu u sredini elementa određen je

smanjeni modul elastičnosti E_T dobiven iz krivulje naprezanje-deformacija za temperaturu na koju je dio elementa zagrijan u peći. Proračun je napravljen za krivulje naprezanje-deformacija uzete iz norme HRN EN1993-1-2:2008, te za krivulje dobivene određivanjem mehaničkih svojstava čelika stacionarnom metodom ispitivanja. Dva preostala konačna elementa zadana su s modulom elastičnosti na atmosferskoj temperaturi jer se temperatura u oba dijela elementa izvan peći neznatno povećala, što je dobiveno eksperimentalnim mjerjenjima temperatura na površini elementa izvan peći [8]. Shematski prikaz inkrementalnog proračuna pomaka dan je na slici 7.

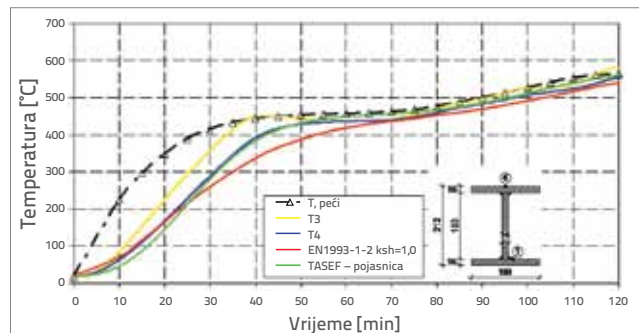


Slika 7. Shematski prikaz inkrementalnog proračuna pomaka (model 1 i 2)

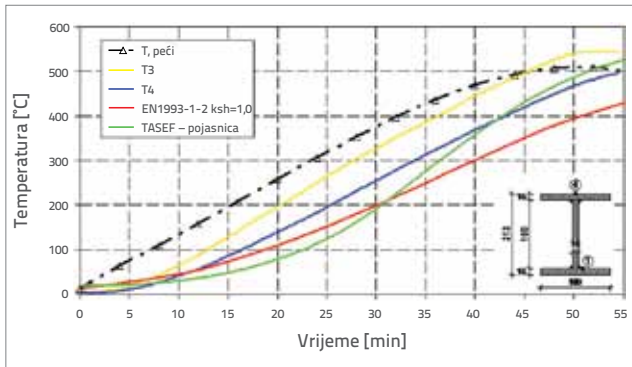
Za slučaj nestacionarnog zagrijavanja elementa proračun pomaka je proveden za temperaturni inkrement od 50°C, s obzirom na to da je razina naprezanja u presjeku elementa u nestacionarnom ispitivanju približno konstantna. Proračun pomaka za slučaj kada je element opterećen uzdužnom silom proveden je primjenom nelinearnog statičkog modela elementa, odnosno primjenom proračuna reznih sila u elementu po teoriji II. reda, uzimajući u obzir početne imperfekcije (početni vertikalni pomak u sredini elementa $\lambda/500$, gdje je λ raspon elementa). Na taj način se uzimaju u obzir povećani pomaci elementa uslijed djelovanja uzdužne sile.

4.3. Rezultati mjerenja uvećanja temperature za slučaj nestacionarne metode

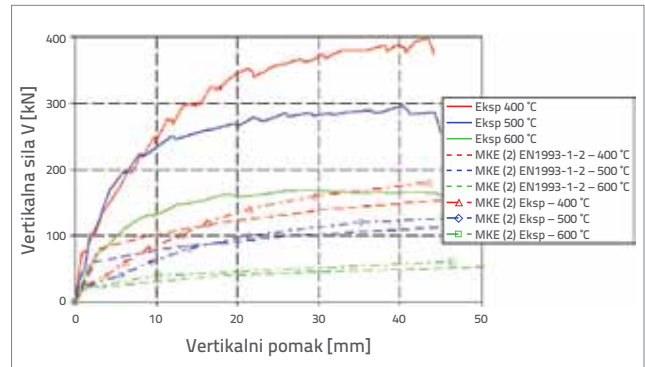
Kako je prije navedeno, u [16] su detaljno prikazane temperature u elementima za stacionarno ispitivanje, dok su u nastavku dani rezultati mjerenja temperatura u vremenu za nestacionarno ispitivanje, slike 8. i 9.



Slika 8. Mjerenje temperatura u nestacionarnom ispitivanju (V=200,0 kN)



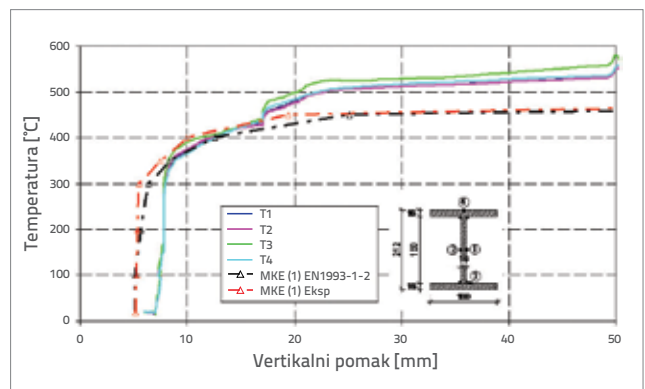
Slika 9. Mjerenje temperatura u nestacionarnom ispitivanju (V=275,0 kN)



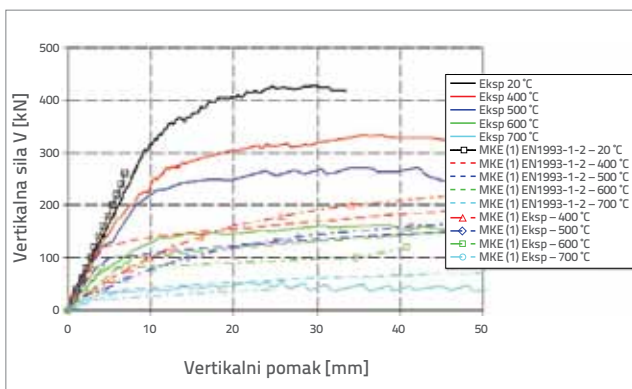
Slika 11. Dijagrami pomaka za element opterećen savijanjem s uzdužnom silom – stacionarno ispitivanje

4.4. Rezultati ispitivanja elementa savijanjem i savijanjem s uzdužnom silom

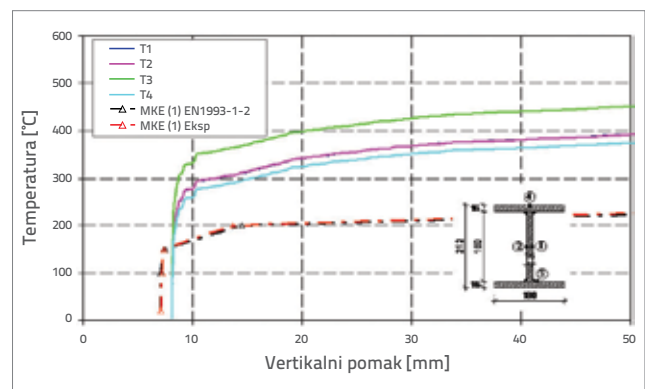
Na slikama 10. – 13. prikazani su rezultati mjerenja pomaka pri ispitivanju elemenata opterećenih savijanjem i savijanjem s uzdužnom silom pri stacionarnoj i nestacionarnoj metodi zagrijavanja. Ti rezultati su uspoređeni s pomacima dobivenim pripadajućom softverskom simulacijom provedenog eksperimenta. Za stacionarno ispitivanje, pomaci su proračunani inkrementalnom procedurom opisanom u poglavlju 4.2 sve dok naprezanja u rubnom vlakancu ne dosegnu vrijednost smanjene granice popuštanja $f_{y, \Theta}$ na temperaturi na koju je zagrijan element. Za nestacionarno ispitivanje, pomaci su proračunani sve do dosezanja kritične temperature pri kojoj je smanjeni modul elastičnosti E_{Θ} približno jednak nuli. Pomaci na elementima proračunani su za skup temperaturno ovisnih vrijednosti granice popuštanja i modula elastičnosti iz provedenog eksperimenta, te iz norme HRN EN1993-1-2:2008.



Slika 12. Dijagrami pomaka za element opterećen savijanjem – nestacionarno ispitivanje (V=200 kN)



Slika 10. Dijagrami pomaka za element opterećen savijanjem – stacionarno ispitivanje



Slika 13. Dijagrami pomaka za element opterećen savijanjem – nestacionarno ispitivanje (V=275 kN)

Predviđanje modela 1 za pomake (predviđanje pomaka za slučaj savijanja elementa) poklapa se s vrijednostima pomaka dobivenih eksperimentom tek pri temperaturi 700°C, dok za predviđanja pomaka modelom 2 kojim se modelira element opterećen poprečnim i uzdužnim opterećenjem postoji veliko odstupanje i na toj temperaturi (slike 10. i 11.).

Razlika između pomaka dobivenih eksperimentom i proračunskim modelima veća je kod slučaja opterećenja elementa s momentom savijanja i uzdužnom silom zbog utjecaja teorije II. reda kod proračuna reznih sila koja u kombinaciji s pretpostavkom idealnog elastoplastičnog ponašanja čelika na visokim temperaturama daje krivu sliku pomaka na elementu. Važno je napomenuti da korišteni modeli 1 i 2 predviđaju pomake sve dok su naprezanja u presjeku manja od vrijednosti reducirane granice popuštanja

čelika $f_{y\theta}$ pri određenoj temperaturi. Iz toga je vidljivo da su pomaci elemenata računani samo do točke početka plastičnog ponašanja čelika. Također, velika odstupanja u početnoj, kao i u kasnijim fazama javljaju se radi pretpostavljanja jednolikog modula elastičnosti za dio elementa koji se nalazi unutar peći, a zbog nemogućnosti diskretizacije poprečnog presjeka elementa. Na taj način u numeričkim analizama ulazi se s nerealno smanjenom krutosti elementa, te se dobivaju veći pomaci i manja nosiva sila (slike 10. i 11.). Nadalje, vidljivo je da se, variranjem parametara granice popuštanja i modula elastičnosti koji su dani normom HRN EN1993-1-2:2008 i vrijednosti istih parametara koji su dobiveni eksperimentalnim putem, u provedenim proračunima dobivaju vrlo slična predviđanja pomaka na elementu. Nepodudaranje rezultata numeričke i eksperimentalne analize pomaka događa se i zbog nemogućnosti uključivanja deformacija od puzanja čelika u numerički model [17] u slučaju nestacionarnog ispitivanja. Sa slika 12. i 13. vidljivo je zadovoljavajuće predviđanje pomaka modela 1 s programom SCIA u odnosu na eksperimentalno određene pomake za manju razinu naprezanja u elementu, te su predviđanja kritične temperature prema modelu 1 oko 10 % manje nego što je stvarna kritična temperatura, dok je za veću razinu naprezanja u elementu predviđanje kritične temperature modela oko 35 % manje nego stvarna kritična temperatura.

4.5. Proračun otpornosti elemenata prema normi HRN EN1993-1-2:2008

Proračun momenta otpornosti analiziranih elemenata klase poprečnog presjeka 1 ili 2 opterećenih na savijanje prema HRN EN1993-1-2:2008 u slučaju djelovanja požara određen je pomoću dva izraza:

$$M_{fi,Ed} = k_{y\theta} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y \tag{1}$$

$$M_{fi,Ed} = \frac{k_{y\theta} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y}{\kappa_1 \cdot \kappa_2} \tag{2}$$

gdje je:

- $k_{y\theta}$ – koeficijent smanjenja za granicu popuštanja,
- $W_{pl,y}$ – plastični moment otpora presjeka,
- f_y – granica popuštanja čelika,
- κ_1, κ_2 – faktori koji uzimaju u obzir nejednoliku razdiobu temperature po poprečnom presjeku elementa te po dužini elementa.

Izrazi (1) i (2) dani su za elemente kod kojih je spriječeno bočno - torzijsko izvijanje elementa, što odgovara provedenoj eksperimentalnoj proceduri u kojoj je element u peći bočno pridržan na polovini raspona. S obzirom na to da postoji temperaturna razlika između gornje i donje pojasnice analiziranih elemenata u iznosu od 30-50°C [16], te da je samo dio elementa grijan na visoku temperaturu, za proračun momenta otpornosti presjeka pri djelovanju požara odabarani

su faktori $\kappa_1 = 0,7$ i $\kappa_2 = 1,0$ prema preporukama HRN EN1993-1-2:2008.

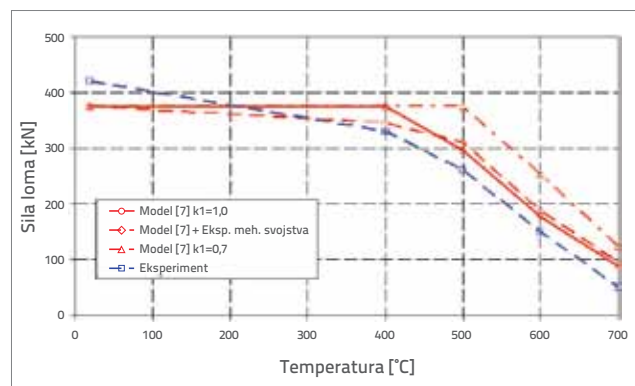
Interakcijska formula za kontrolu otpornosti elemenata opterećenih uzdužnom silom i momentom savijanja u slučaju djelovanja požara dana je izrazom:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} \cdot A \cdot k_{y\theta} \cdot f_y} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} \cdot k_{y\theta} \cdot f_y} \leq 1,0 \tag{3}$$

gdje je:

- $N_{fi,Ed}$ – vanjska tlačna sila
- $M_{y,fi,Ed}$ – moment od vanjske vertikalne sile
- k_y – koeficijent koji uzima u obzir neravnomjernu razdiobu momenta savijanja po elementu
- $\chi_{min,fi}$ – koeficijent redukcije za os presjeka s najvećom vitkosti za slučaj djelovanja požara
- A – površina poprečnog presjeka.

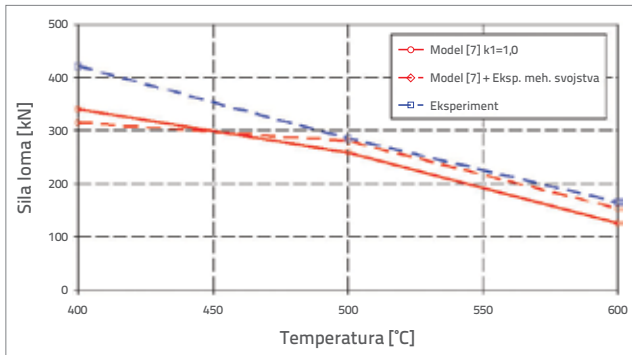
Iz momenta otpornosti poprečnog presjeka $M_{fi,Ed}$ dobivenog prema izrazima (1) i (2) moguće je odrediti lomnu silu iz jednakosti momenta savijanja od vanjskog opterećenja $M_{y,fi,Ed}$ i momenta otpornosti elementa $M_{fi,Ed}$. Isto vrijedi i za interakcijski izraz (3), gdje se traži moment od vanjskog opterećenja $M_{y,fi,Ed}$ kod kojeg je iskorištenost elementa 100 %. Na slici 14. dan je prikaz sile loma pri kojoj dolazi do prekoračenja otpornosti elementa za slučaj kad je moment od vanjskog opterećenja jednak momentu otpornosti $M_{fi,Ed}$ dobivenog korištenjem izraza (1) i (2) u ovisnosti o temperaturi za slučaj elementa opterećenog na savijanje. Dana je usporedba dobivenih sila loma za slučaj dviju različitih vrijednosti faktora κ_1 sa silom loma elementa dobivenom tijekom eksperimenta. Vidljivo je da izrazi za otpornost elementa iz HRN EN1993-1-2:2008 predviđaju vrijednosti sila loma oko 15 % veće nego što pokazuje eksperiment za slučaj korištenja izraza (1), dok se za slučaj korištenja izraza (2) javljaju veća odstupanja u iznosu od približno 40 %.



Slika 14. Sila loma elementa u ovisnosti o temperaturi – usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja modela HRN EN1993-1-2:2008 za slučaj savijanja

Na slici 15. dan je prikaz sile loma pri kojoj dolazi do prekoračenja otpornosti elementa, koja je proračunana korištenjem izraza

(3) u ovisnosti o temperaturi za slučaj elementa opterećenog na savijanje s uzdužnom silom. Iz rezultata je vidljivo da su za slučaj savijanja s uzdužnom silom predviđanja sile loma prema normi HRN EN1993-1-2:2008 na strani sigurnosti u rasponu 10-30 %.



Slika 15. Sila loma u ovisnosti o temperaturi – usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja modela Eurokoda 3 za slučaj savijanja s uzdužnom silom

5. Zaključak

S obzirom na provedenu eksperimentalnu i teorijsku analizu mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Za analiziranu proizvodnu seriju čelika S355, mehanička svojstva, uključujući krivulje naprezanje-deformacija na visokim temperaturama mogu se dovoljno precizno aproksimirati s vrijednostima danim u HRN EN1993-1-2:2008

- Pomaci na elemenima koji se ispituju stacionarnom metodom zagrijavanja, a potom opterećuju, ne mogu se dovoljno precizno proračunati dostupnim računalnim programima [17] – nemogućnost uzimanja u obzir materijalne nelinearnosti, uključujući puzanje čelika na različitim temperaturama i različitim razinama naprezanja
- Bolja predviđanja pomaka računalnim programom [17] opažena su kod nestacionarnog zagrijavanja elemenata kod kojeg su, radi ispitne procedure, odstupanja rezultata za manju razinu naprezanja gotovo zanemariva, dok se kod viših razina naprezanja odstupanje javlja isključivo zbog neadekvatnog uzimanja u obzir puzanja čelika pri visokim temperaturama
- Sile loma koje se računaju preko momenta otpornosti čeličnog elementa u slučaju djelovanja požara za elemente koji imaju neravnomjernu distribuciju temperature po poprečnom presjeku i opterećeni su momentom savijanja, te preko faktora κ_1 i κ_2 daju nerealne rezultate u odnosu na vrijednosti dobivene ovim istraživanjem i potrebno je ograničiti njihovu uporabu u inženjerskim proračunima otpornosti čeličnih elemenata na visokim temperaturama.

Zahvala

Ispitivanja opisana u ovome članku provedena su u sklopu znanstvenog projekta br. 083-1465 "Pouzdanost konstrukcija i procjena rizika uslijed ekstremnih djelovanja" i znanstvenog projekta br. 083-000000-1538 "Eksperimentalna i numerička istraživanja potresne otpornosti građevina" koje podupire Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

LITERATURA

- [1] Phan, L. T., McAllister, T. P. & Gross, J. L.: Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings, NISTIR 7563, Draft version, Building and Fire Research Laboratory, NIST, 2009.
- [2] Dwaikat, M. & Kodur, V.: Performance Based Design Approach for Evaluating Fire Resistance of Restrained Steel Beams, *Proceedings of the Sixth International Conference Structures in fire*, Michigan, pp. 106-113, 2010.
- [3] Takagi, J. & Deierlein, G. G.: Strength Design Criteria for Steel Members at Elevated Temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, 63, (2007), 8, pp. 1036-1050.
- [4] Vila Real, P.M.M., Piloto, P.A.G. & Franssen, J.-M.: A new proposal of a simple model for the lateral-torsional buckling of unrestrained steel beams in case of fire: experimental and numerical validation, *Journal of Constructional Steel Research* 59, (2003), 2, 179-199.
- [5] Bailey, C. G., Burgess, I. W. & Plank, R. J.: The Lateral-torsional Buckling of Unrestrained Steel Beams in Fire, *Journal of Constructional Steel Research* 36, (1996), 2, 101-119.
- [6] Franssen, J. M., Kodur, V. & Zaharia, R.: *Designing Steel Structures for Fire Safety*, CRC Press, London, UK, 2009.
- [7] HRN EN 1993-1-2:2008, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-2: General Rules Structural Fire Design, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- [8] Boko, I.: Određivanje stupnja sigurnosti nosivih čeličnih konstrukcija izloženih djelovanju požara, doktorska disertacija, Građevinsko-arhitektonski fakultet Split, 2005.
- [9] Schleich, J.B.: Maximum stress level of structural steel in function of the temperature – strain hardening included – through numerical simulations of uniformly heated steel beams during transient state bending tests, Working documents, Luxembourg, 1988-1989.
- [10] Wainman, D. E. & Kirby, B. R.: Compendium of UK Standard Fire Test Data: Unprotected Structural Steel – 1 & 2, British Steel Corporation, 1988.
- [11] Cooke, G. M. E.: An introduction to the Mechanical Properties of Structural Steel at Elevated Temperatures, *Fire Safety Journal*, 13, (1988), pp. 45-54.

- [12] Kirby, B.: The Behaviour of Structural Steels Manufactured by BSC under Stress Controlled Anisothermal Creep Conditions, Report SH/RS/3664/4/83/B, BSC Sheffield Laboratories, 1983.
- [13] Kirby, B. R. & Preston, R. R.: High Temperature Properties of Hot-Rolled, Structural Steels for Use in Fire Engineering Design Studies, *Fire Safety Journal*, 13, (1988), pp. 27-37.
- [14] Boko, I., Peroš, B. & Torić, N.: Pouzdanost čeličnih konstrukcija u požaru, *Građevinar*, 62, (2010), 5, pp. 389-400.
- [15] Kruppa J., Twilt L., Weche J. & Cooke J.: Fire Protection of Structural Steelwork, ECSC project SA 314, 1995.
- [16] Boko, I., Torić, N. & Peroš, B.: Analiza proračunskih modela provođenja topline iz EN1993-1-2, *Građevinar* 64, (2012), 4, pp. 285-292.
- [17] SCIA Engineer 2008 Manual, Advanced calculations, Nemetschek Scia, 2008.