



Karakteristike materijala za gradnju iz aspekta požarne otpornosti konstrukcija i pouzdanost Eurokoda

Autori:

Izv. prof. dr. sc. **Neno Torić**

Prof. dr. sc. **Ivica Boko**

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Karakteristike materijala za gradnju iz aspekta požarne otpornosti konstrukcija i pouzdanost Eurokoda

Neno Torić, Ivica Boko

Sažetak

U radu je dan sažeti prikaz utjecaja požara na redukciju mehaničkih svojstava betonskih, čeličnih, aluminijskih i drvenih konstrukcija te usporedba s rezultatima dobivenih iz raznih eksperimentalnih ispitivanja. Također, dan je primjer istraživanja pouzdanosti norme HRN EN 1993-1-2 uz kratak sažetak rezultata dobivenih istraživačkim projektom Hrvatske zaklade za znanost vezanim za utjecaj deformacija od puzanja na redukciju nosivosti čeličnih i aluminijskih stupova.

Gljučne riječi: čelik, beton, drvo, aluminij, požar, Eurokod, čvrstoća

Material properties related to fire resistance of structures and the reliability of Eurocode

Abstract

The paper presents a summary of mechanical properties for concrete, steel, aluminium and timber structures which are compared to results from different experimental studies. Furthermore, an example of a research (funded by Croatian Science Foundation) that investigates the reliability of the existing construction norm HRN EN 1993-1-2 is presented by providing a summary of the project's results. The mentioned research project investigates the influence of creep strain on the reduction of load bearing capacity of steel and aluminium columns.

Key words: steel, concrete, timber, aluminium, fire, Eurocode, strength

1 Uvod

Suvremeni trendovi građenja koji su sada prisutni u graditeljstvu omogućili su primjenu različitih vrsta građevnih materijala u značajno širem opsegu nego što je to bilo u tradicionalnom projektiranju i izvođenju armiranobetonskih, čeličnih, aluminijских i drvenih konstrukcija. Najnoviji primjer koji to ilustrira jest uvođenje križno lameliranog drva u građevnu praksu za gradnju stambenih i javnih objekata. Primjeri kao što su stambena zgrada Mjøstårnet u gradu Brumunddal ili zgrada Treet u gradu Bergenu svijetli su primjer uvođenja novog tipa nosivih konstrukcija za široku primjenu u građevinarstvu koji dosad nije postojao u svijetu, slika 1.



Slika 1. a) zgrada Mjøstårnet, Norveška; b) zgrada Treet, Norveška

Kao posljedica primjene različitih vrsta građevnih materijala ili njihove kombinacije u graditeljstvu nastao je jedan od glavnih problema u vezi s propisima koji će definirati požarnu otpornost nosive konstrukcije. To je još važnije ako se javljaju novi tipovi konstrukcija koji nisu obuhvaćeni suvremenim europskim normama ili nisu dovoljno znanstveno istraženi. U okviru suvremenih europskih normi (Eurokodova) dane su smjernice za određivanje požarne otpornosti konstrukcija koje su pretežno izgrađene od jedne vrste građevnog materijala.

Svrha je ovog rada osvrnuti se na primjerenost suvremenih europskih normi u okviru modernih trendova gradnje na način da se prikažu neki od nedavnih primjera požarnih nesreća u svijetu. Nadalje, svrha rada je upoznati čitatelja s osnovnim požarnim svojstvima pojedine

vrste građevnih materijala koji se pretežno koriste u građevinarstvu (beton, čelik, drvo i aluminij). Da bi se predočila primjerenost europskih normi u ovom su radu uspoređena neka svojstva iz tih normi s dostupnim eksperimentalnim istraživanjima.

2 Nedavni primjeri oštećenja i slom konstrukcija uslijed djelovanja požara

2.1. Crkva Notre Dame

Dana 15. travnja 2019. godine nastao je požar u unutrašnjosti crkve Notre Dame u Parizu za vrijeme njezine obnove zbog dotrajalosti vanjskih elemenata. Požar je potpuno uništio krovnu konstrukciju i šiljasti toranj, osim kamenih zidova, slika 2. Zanimljivost je da se požar dogodio iako su postojale brojne mjere opreza, uključujući i dežurnog vatrogasca koji je pregledavao drvenu konstrukciju triput dnevno.



Slika 2. a) Prikaz krovišta Notre Dame; b) Prikaz požara u crkvi

2.2 Bivša zgrada policije u Sao Paulu, Brazil

Nekoć bivša zgrada policije u Sao Paulu s ukupno 24 kata, kasnije korištena kao skvotersko naselje za beskućnike, izgorjela je 1. svibnja 2018. Konstrukcija zgrade je doživjela progresivni kolaps nakon požara koji se najvjerojatnije proširio s petog kata na ostale putem okna za dizalo koje nije bilo u funkciji i popunjeno smećem koje je poteklo od stanara zgrade. Prema informacijama dostupnim u medijima, život je izgubila jedna osoba, slika 3.



Slika 3. a) Zgrada u Sao Paulu; b) Prikaz požara u zgradi

2.3 Grenfell tower u Londonu, Engleska

Zasigurno medijski najpraćeniji slučaj požara koji se dogodio nakon rušenja blizanaca u New Yorku bio je požar u zgradi Grenfell 14. lipnja 2017. Tada su 72 osobe izgubile život. Do požara je došlo u jednom od stanova u zgradi koji se proširio na ostatak zgrade izgaranjem gorive fasade koja je bila postavljena nakon predviđenog renoviranja zgrade, slika 4.



Slika 4. a) Grenfell tower prije renoviranja; b) Prikaz požara u zgradi

3 Suvremene europske norme i požarna otpornost konstrukcija

3.1 Uvod

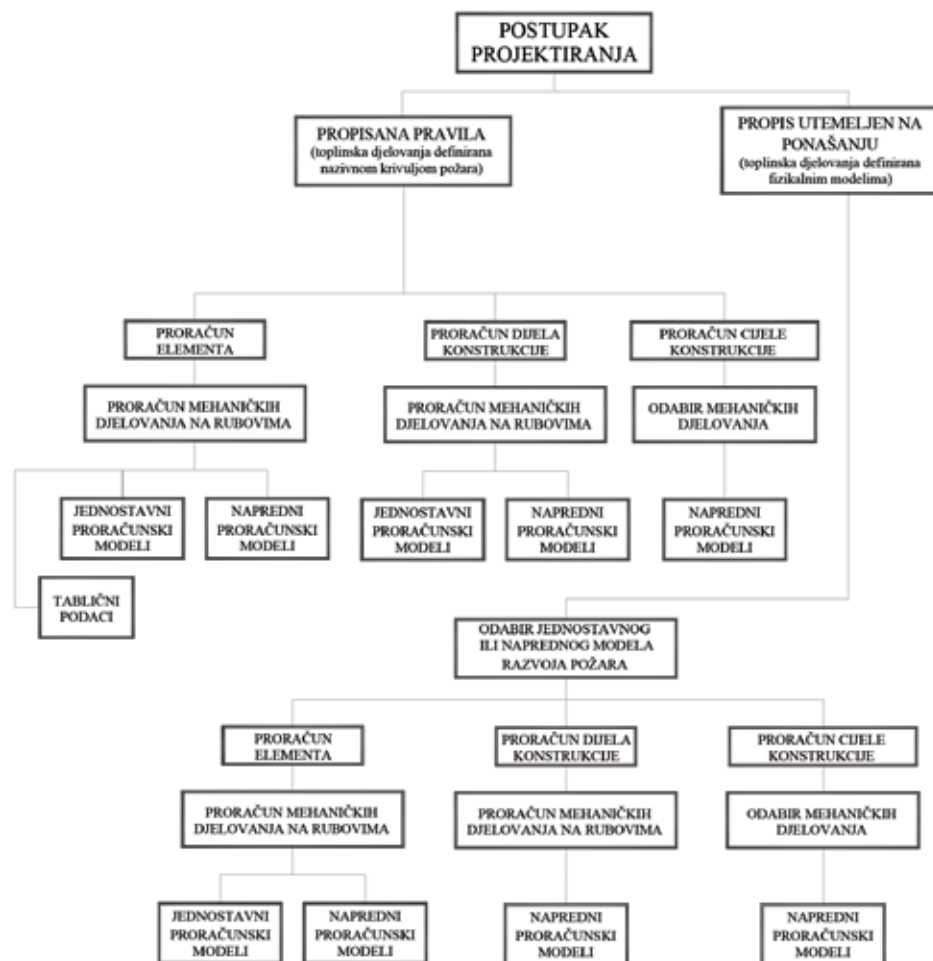
Suvremene europske norme (Eurokodovi) tretiraju požar kao jedno od mogućih izvanrednih djelovanja na građevinu. U skladu s navedenim te temeljnim zahtjevima za građevinu definiranim u Zakonu o gradnji, u svakom od Eurokodova za konstrukcije definirana je posebna norma koja daje preporuke za proračun požarne otpornosti pojedinog tipa konstrukcija ovisno o konstrukcijskom materijalu. Ovdje se navodi lista normi koje pobliže obrađuju požarnu otpornost pojedinih vrsta konstrukcija:

- HRN EN 1991–1–2:2012 – Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1–2: Opća djelovanja – Djelovanja na konstrukcije izložene požaru
- HRN EN 1992–1–2:2013 – Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara
- HRN EN 1993–1–2:2014 – Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara
- HRN EN 1994–1–2:2012 – Eurokod 4: Projektiranje spregnutih čelično–betonskih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara
- HRN EN 1995–1–2:2013 – Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija – Dio 1–2: Općenito – Proračun konstrukcija na djelovanje požara
- HRN EN 1996–1–2:2012 – Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara
- HRN EN 1999–1–2:2015 – Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija – Dio 1–2: Proračun konstrukcija na djelovanje požara

Posebnosti proračuna požarnih djelovanja i požarne otpornosti vezano za pojedinu državu koja primjenjuje europske norme dane su kroz mogućnost primjene nacionalnih dodataka. Tako je i Republika Hrvatska preko Hrvatskog zavoda za norme, uz usvajanje osnovnih normi, donijela i nacionalne dodatke:

- HRN EN 1991–1–2:2012/NA:2012 – Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1–2: Opća djelovanja – Djelovanja na konstrukcije izložene požaru – Nacionalni dodatak
- HRN EN 1992–1–2:2013/NA:2013 – Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara – Nacionalni dodatak
- HRN EN 1993–1–2:2014/NA:2014 – Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara – Nacionalni dodatak
- HRN EN 1994–1–2:2012/NA:2012 – Eurokod 4: Projektiranje spregnutih čelično–betonskih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara – Nacionalni dodatak
- HRN EN 1995–1–2:2013/NA:2013 – Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija – Dio 1–2: Općenito – Proračun konstrukcija na djelovanje požara – Nacionalni dodatak
- HRN EN 1996–1–2:2012/NA:2012 – Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara – Nacionalni dodatak
- HRN EN 1999–1–2:2015/NA:2015 – Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija – Dio 1–2: Proračun konstrukcija na djelovanje požara – Nacionalni dodatak

Prikaz mogućnosti proračuna nosivih konstrukcija uslijed djelovanja požara primjenom propisanih pravila i propisa utemeljenih na ponašanju prema europskim normama – Eurokodu izložen je na slici 5.



Slika 5. Postupci projektiranja prema Eurokodu

Svaki od Eurokodova koji su vezani za djelovanje požara na konstrukcije sadrži sljedeće cje-line:

- Osnove projektiranja
 - Proračun požarnog djelovanja
 - Metode kojima se utvrđuje nosivost konstrukcije
 - Tip analize nosivosti konstrukcije
- Svojstva materijala
 - Mehanička svojstva
 - Toplinska svojstva
- Proračunske metode
 - Određivanje požarne otpornosti primjenom tabličnih podataka
 - Jednostavni proračunski modeli požarne otpornosti
 - Napredni proračunski modeli požarne otpornosti
- Konstrukcijski detalji.

U nastavku je dan sažetak formata proračuna otpornosti na požar pojedinih tipova građevnih materijala odnosno konstrukcija koji uključuje definiciju mehaničkog svojstva na određenoj temperaturi te krivulje naprezanje–deformacija. Također, dana je usporedba s dostupnim eksperimentalnim istraživanjima za pojedino svojstvo da bi se dobio uvid u veličinu varijacije koja je prisutna u istraživanjima u odnosu na normirane vrijednosti.

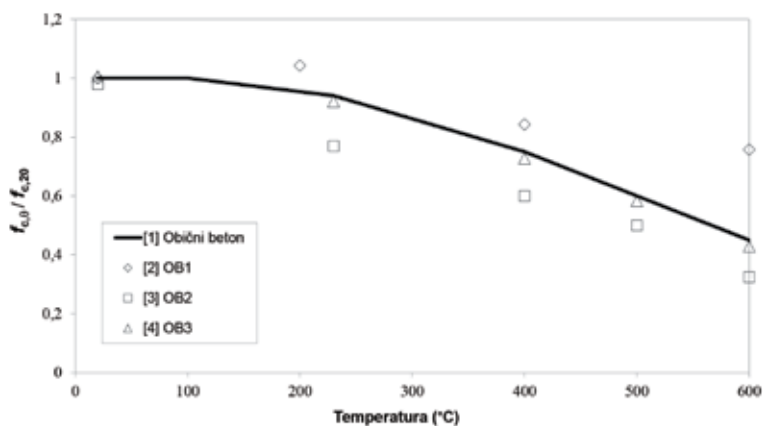
3.2 Otpornost betonskih konstrukcija pri djelovanju požara

Da bi se dokazala nosivost betonskih nosivih elemenata, proračunske vrijednosti mehaničkih svojstava materijala (naponska i deformacijska svojstva) $X_{d,fi}$ definiraju se prema izrazu (1) [1]:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (1)$$

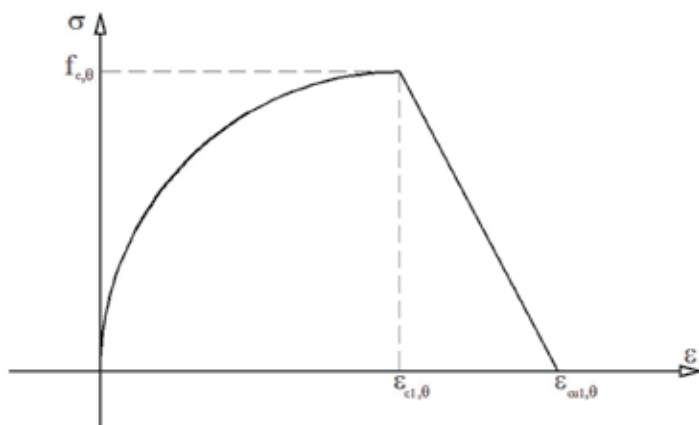
gdje je: X_k – karakteristična vrijednost naponskog i deformacijskog svojstva (f_k ili E_k), za proračun konstrukcije pri atmosferskoj temperaturi, k_{θ} – koeficijent redukcije naponskog i deformacijskog svojstva, koji ovisi o promatranoj temperaturi u odnosu na atmosfersku temperaturu, $\gamma_{M,fi}$ – parcijalni faktor sigurnosti za odgovarajuće svojstvo materijala, za slučaj požara (=1.00).

Na slici 6. dan je prikaz redukcije tlačne čvrstoće običnog betona (betoni s tlačnom čvrstoćom do 60 MPa) na različitim temperaturama i usporedba s dostupnim eksperimentalnim istraživanjima.



Slika 6. Dijagram redukcije tlačne čvrstoće betona na određenim razinama temperature

Dijagram naprezanje – deformacija ($\sigma - \epsilon$ dijagram) za betonske konstrukcije u tlaku, sa svim karakterističnim točkama na visokim (požarnim) temperaturama, prikazan je na slici 7.



Slika 7. Dijagram naprezanje–deformacija za beton na temperaturi θ

gdje je: $f_{c,\theta}$ – tlačna čvrstoća na temperaturi θ (MPa), $\epsilon_{c1,\theta}$ – deformacija pri slomu na temperaturi θ [%], $\epsilon_{cu1,\theta}$ – krajnja deformacija na temperaturi θ (%).

$$\sigma = \frac{3\epsilon f_{c,\theta}}{\epsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)} \text{ za } \epsilon \leq \epsilon_{c1,\theta} \quad (2)$$

$$\text{Linearni pad za } \epsilon_{c1,\theta} < \epsilon \leq \epsilon_{cu1,\theta} \quad (3)$$

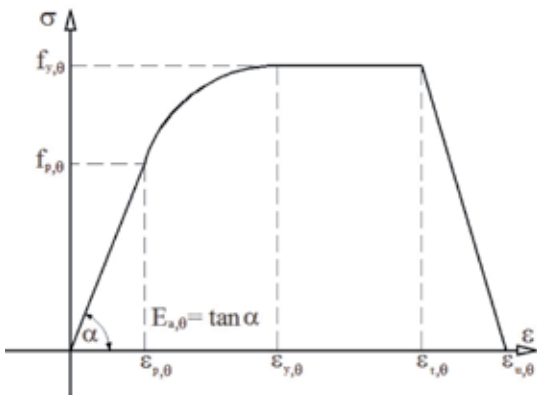
3.3 Otpornost čeličnih konstrukcija pri djelovanju požara

Da bi se dokazala nosivost čeličnih nosivih elemenata, proračunske vrijednosti mehaničkih svojstava materijala (naponska i deformacijska svojstva) $X_{d,fi}$ definiraju se izrazom (4), prema [5]:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (4)$$

gdje je: X_k – karakteristična vrijednost naponskog i deformacijskog svojstva (f_k ili E_k), za proračun konstrukcije pri atmosferskoj temperaturi, k_{θ} – koeficijent redukcije naponskog i deformacijskog svojstva koji ovisi o promatranoj temperaturi u odnosu na atmosfersku temperaturu, $\gamma_{M,fi}$ – parcijalni faktor sigurnosti za odgovarajuće svojstvo materijala, za slučaj požara (=1,00).

Dijagram naprezanje – deformacija ($\sigma - \epsilon$ dijagram) za čelične konstrukcije, sa svim karakterističnim točkama na visokim (požarnim) temperaturama prikazan je na slici 8. i definiran je izrazima (5)–(10):



Slika 8. Dijagram naprezanje–deformacija za čelik na temperaturi θ

gdje je: $f_{p,\theta}$ – granica proporcionalnosti na temperaturi θ (MPa), $f_{y,\theta}$ – granica popuštanja na temperaturi θ (MPa), $E_{a,\theta}$ – modul elastičnosti na temperaturi θ (MPa), $\epsilon_{p,\theta}$ – deformacija na granici proporcionalnosti na temperaturi θ (%), $\epsilon_{y,\theta}$ – deformacija na granici popuštanja na temperaturi θ (%), $\epsilon_{t,\theta}$ – granična deformacija za granicu popuštanja na temperaturi θ (%), $\epsilon_{u,\theta}$ – deformacija pri slomu na temperaturi θ (%).

$$\sigma = E_{a,\theta} \quad \text{za} \quad \epsilon \leq \epsilon_{p,\theta} \quad (5)$$

$$\sigma = f_{p,\theta} - c + (b/a) \left[a^2 - (\epsilon_{y,\theta} - \epsilon)^2 \right]^{0.5} \quad \text{za} \quad \epsilon_{p,\theta} < \epsilon < \epsilon_{y,\theta} \quad (6)$$

$$\sigma = f_{y,\theta} \quad \text{za} \quad \epsilon_{y,\theta} < \epsilon < \epsilon_{t,\theta} \quad (7)$$

$$\sigma = f_{y,\theta} \left[1 - (\epsilon - \epsilon_{t,\theta}) / (\epsilon_{u,\theta} - \epsilon_{t,\theta}) \right] \quad \text{za} \quad \epsilon_{t,\theta} < \epsilon < \epsilon_{u,\theta} \quad (8)$$

$$\sigma = 0 \quad \text{za } \varepsilon = \varepsilon_{u,0} \quad (9)$$

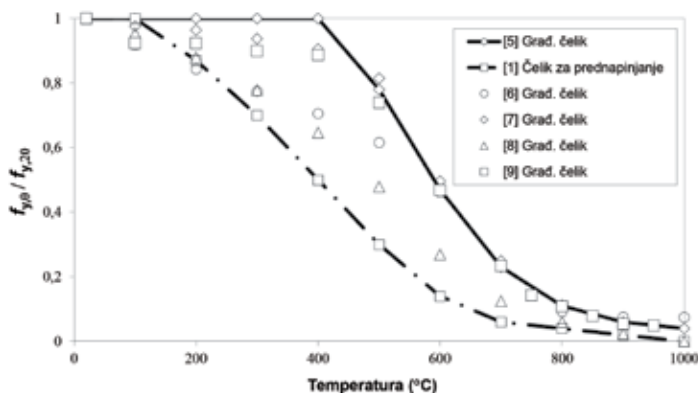
$$a^2 = (\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0})(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0} + c / E_{a,0})$$

$$b^2 = c(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0})E_{a,0} + c^2 \quad (10)$$

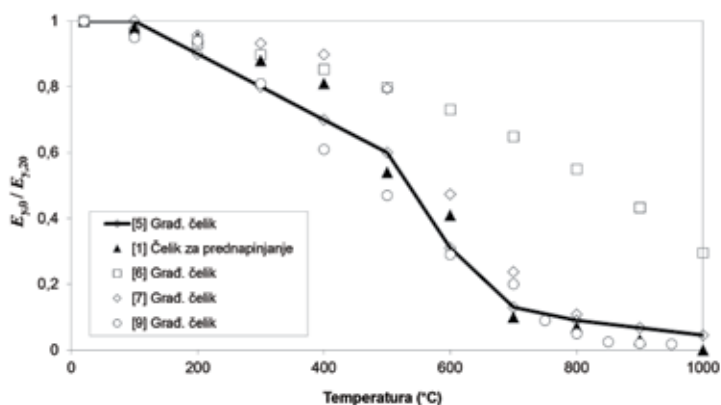
$$c = \frac{(f_{y,0} - f_{p,0})^2}{(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0})E_{a,0} - 2(f_{y,0} - f_{p,0})}$$

gdje je $\varepsilon_{p,0} = f_{p,0} / E_{a,0}$, $\varepsilon_{y,0} = 0,02$, $\varepsilon_{t,0} = 0,15$ te $\varepsilon_{u,0} = 0,20$.

Dijagram redukcije granice popuštanja čelika na određenim razinama temperature i usporedba s dostupnim eksperimentalnim ispitivanjima prikazan je na slici 9. Dijagram redukcije modula elastičnosti čelika na određenim razinama temperature i usporedba s dostupnim eksperimentalnim ispitivanjima prikazan je na slici 10.



Slika 9. Dijagram redukcije granice popuštanja čelika na određenim razinama temperature



Slika 10. Dijagram redukcije modula elastičnosti čelika na određenim razinama temperature

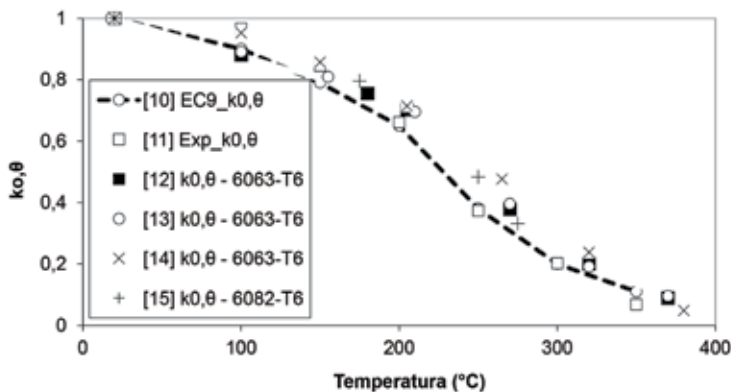
3.4 Otpornost aluminijskih konstrukcija pri djelovanju požara

Dokaz nosivosti konstrukcijskih elemenata od aluminijskih legura na visokim (požarnim) temperaturama provodi se koristeći proračunske vrijednosti mehaničkih svojstava materijala (naponska i deformacijska svojstva) $X_{d,fi}$ izrazom (11) prema [10].

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (11)$$

gdje je: X_k – karakteristična vrijednost naponskog i deformacijskog svojstva (f_k ili E_k), za proračun konstrukcije pri atmosferskoj temperaturi, k_{θ} – koeficijent redukcije naponskog i deformacijskog svojstva, koji ovisi o promatranoj temperaturi u odnosu na atmosfersku temperaturu, $\gamma_{M,fi}$ – parcijalni faktor sigurnosti za odgovarajuće svojstvo materijala, za slučaj požara ($=1,00$).

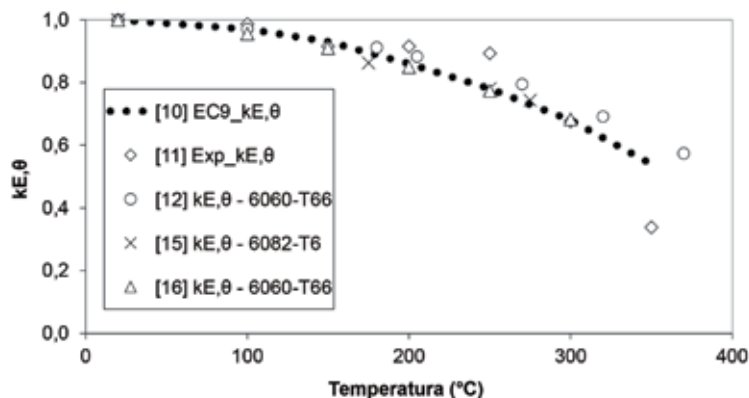
Na slici 11 prikazan je dijagram redukcije granice popuštanja aluminija za konstrukcijske slitine EN 6063–T6 i 6082–T6 na određenim razinama temperature i usporedba s dostupnim eksperimentalnim ispitivanjima.



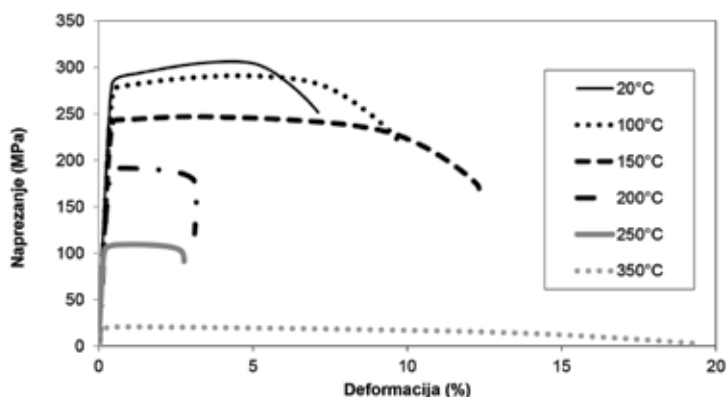
Slika 11. Dijagram redukcije granice popuštanja konstrukcijskih aluminijskih slitina EN6063–T6 i EN6082 T6 na određenim razinama temperature

Dijagram redukcije modula elastičnosti aluminija za konstrukcijske slitine EN6060–T66 i EN6082–T6 na određenim razinama temperature i usporedba s dostupnim eksperimentalnim ispitivanjima prikazan je na slici 12.

Eksperimentalno određeni dijagram naprezanje – deformacija ($\sigma - \epsilon$ dijagram) za aluminijske konstrukcije – slitina EN6082AW T6 [11] prikazan je na slici 13.



Slika 12. Dijagram redukcije modula elastičnosti aluminija na određenim razinama temperature



Slika 13. Dijagram naprežanje–deformacija za aluminij EN 6082AW T6 na temperaturi θ

3.5 Otpornost drvenih konstrukcija pri djelovanju požara

Da bi se dokazala nosivost drvenih nosivih elemenata, proračunske vrijednosti mehaničkih svojstava materijala (naponska i deformacijska svojstva) definiraju se izrazima (12) i (13) prema [17]:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (12)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (13)$$

gdje je: $f_{d,fi}$ – proračunska čvrstoća u požaru, $S_{d,fi}$ – proračunski modul elastičnosti (posmika) u požaru, f_{20} – 20–postotna fraktila čvrstoće na atmosferskoj temperaturi, S_{20} – 20–postotna

fraktila modula elastičnosti (posmika) na atmosferskoj temperaturi, $k_{\text{mod,fi}}$ – faktor modifikacije za požar, $\gamma_{\text{M,fi}}$ – parcijalni faktor sigurnosti za drvo u požaru (1.00).

Proračunska vrijednost otpornosti spojeva $R_{\text{fi,d}}$ u slučaju djelovanja požara u vremenu t računa se prema izrazu (14):

$$R_{\text{d,fi,t}} = \eta \frac{R_{20}}{\gamma_{\text{M,fi}}} \quad (14)$$

gdje je: R_{20} – 20-postotna fraktila otpornosti spojeva na atmosferskoj temperaturi bez utjecaja trajanja djelovanja i vlažnosti ($k_{\text{mod}}=1$), η – faktor konverzije, $\gamma_{\text{M,fi}}$ – parcijalni faktor sigurnosti za drvo u požaru (1.00).

Vrijednosti 20-postotne fraktile čvrstoće i modula elastičnosti (posmika) izračunavaju preko izraza (15) i (16):

$$f_{20} = k_{\text{fi}} \cdot f_k \quad (15)$$

$$S_{20} = k_{\text{fi}} \cdot S_{05} \quad (16)$$

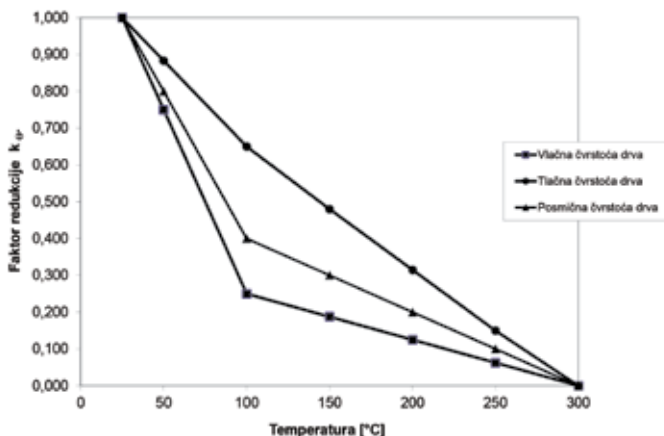
gdje je: f_{20} – 20 postotna fraktila čvrstoće na atmosferskoj temperaturi, S_{20} – 20 postotna fraktila modula elastičnosti (posmika) na atmosferskoj temperaturi, S_{05} – 5 postotna fraktila modula elastičnosti (posmika) na atmosferskoj temperaturi, k_{fi} – požarni koeficijent.

Vrijednosti 20 postotne fraktile otpornosti spojeva R_{20} računa se prema izrazu (17):

$$R_{20} = k_{\text{fi}} \cdot R_k \quad (17)$$

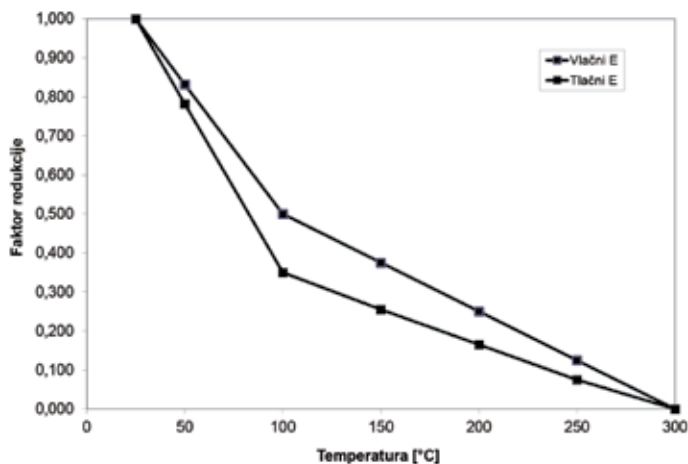
gdje je: R_k – karakteristična vrijednost otpornosti spojeva na atmosferskoj temperaturi bez utjecaja trajanja djelovanja i vlažnosti ($k_{\text{mod}}=1$), k_{fi} – požarni koeficijent.

Dijagram redukcije mehaničkih karakteristika – čvrstoća drva na određenim razinama temperature prikazan je na slici 14.



Slika 14. Dijagram redukcije mehaničkih karakteristika drva ovisno o temperaturi

Dijagram redukcije mehaničkih karakteristika – modula elastičnosti drva na određenim razinama temperature prikazan je na slici 15.



Slika 15. Dijagram redukcije modula elastičnosti drva ovisno o temperaturi

4 Istraživanja pouzdanosti požarnih normi

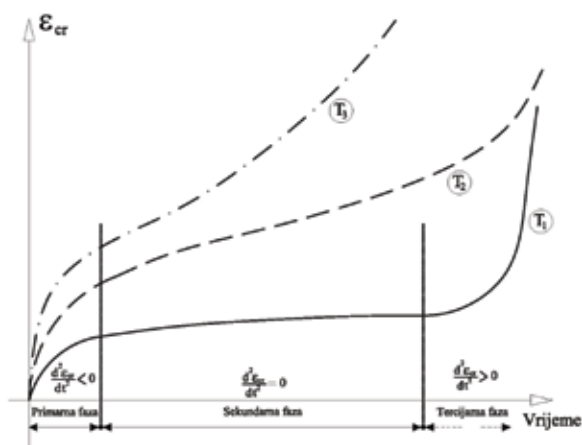
U poglavlju 3 dana je usporedba eksperimentalno određenih mehaničkih svojstava s kodificiranim vrijednostima iz normi. Iz usporedbe za obični beton, čelik i aluminij vidljivo je da kodificirane vrijednosti iz Eurokodova mogu poslužiti kao reprezentativna veličina kad su u pitanju osnovna mehanička svojstva poput čvrstoće i modula elastičnosti. Razlozi odstupanja od kodificiranih vrijednosti na pojedinim slikama (slike 6, 9, 10, 11 i 12) prelaze okvire ovog rada i uglavnom su vezani za korištene parametre testiranja. Međutim, sama mehanička svojstva pojedinog građevnog materijala nisu jedini faktori koji utječu na požarnu otpornost konstrukcija. Donosi se primjer istraživanja primjenjivosti normi HRN EN 1993–1–2 [5] i HRN EN 1999–1–2 [10] u slučaju razvoja prekomjernih deformacija od puzanja u slučaju požara.

Uspostavni projekt Hrvatske zaklade za znanost UIP 2014–09–5711 naziva: Utjecaj deformacija od puzanja na nosivost čeličnih i aluminijskih stupova pri djelovanju požara obrađivao je problem pojave deformacija od puzanja koje, prema rezultatima istraživanja, imaju utjecaj na značajniju redukciju nosivosti čeličnih i aluminijskih stupova.

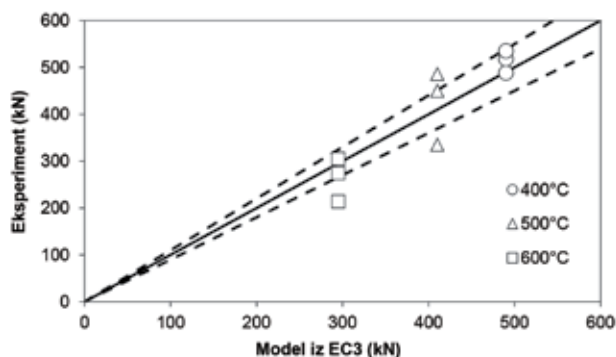
Puzanje metala predstavlja vremenski ovisan proces koji se događa uslijed izlaganja metala vanjskom opterećenju. Puzanje metala jače je izraženo pri djelovanju visokih temperatura nego li kod atmosferskih temperatura. Pri visokim temperaturama mehanizam deformiranja je izraženiji, pri čemu gibanje atoma metala unutar kristalne rešetke postaje značajno. Glavni mikroskopski mehanizmi deformiranja koji opisuju puzanje su: klizanje dislokacija u kristalnoj rešetci, uspon dislokacije, klizanje granica kristalnih zrna te difuzija atoma i praznina u rešetci. Najvažniji od mehanizama za djelovanje puzanja pri visokim temperaturama jest uspon dislokacije kad se dislokacije „uspinju“ na susjednu slobodnu ravninu klizanja.

Općenito, pri djelovanju konstantnog napreznja i temperature, deformacije od puzanja čelika prolaze kroz tri faze kao što je prikazano na slici 16. U početnoj fazi, tzv. fazi primarnog puzanja, uočljiva je velika brzina prirasta deformacije od puzanja u vremenu, koja se polagano smanjuje na konstantnu vrijednost prirasta deformacije. U sekundarnoj je fazi brzina prirasta deformacije od puzanja približno konstantna. U tercijarnoj fazi brzina prirasta deformacije od puzanja doživljava eksponencijalni rast u trenutku kada čelik dolazi do točke pucanja. Na slici 16. uočljivo je da kod većih vrijednosti temperatura ne postoji naglašeni prijelaz iz sekundarne u tercijarnu fazu puzanja. Stoga se za potrebe modeliranja ponašanja čeličnih i aluminijevskih konstrukcija pri djelovanju požara često uzimaju u obzir samo primarna i sekundarna faza puzanja čelika.

Na slici 17. prikazana je usporedba rezultata numeričke analize nosivosti čeličnih stupova prema parametrima iz Eurokoda 3 i rezultata eksperimenata u kojima se javljaju deformacije od puzanja.



Slika 16. Faze puzanja čelika pri visokim temperaturama ($T_1 < T_2 < T_3$)



Slika 17. Usporedba rezultata numeričke analize nosivosti čeličnih stupova prema parametrima iz Eurokoda 3 i rezultata eksperimenata

Vidljivo je iz usporedbe da razina konzervativnih vrijednosti požarnih parametara iz Eurokoda 3 opada s povećanjem temperature ako je usporedba s eksperimentalnim rezultatima. To pokazuje da deformacije od puzanja nisu adekvatno uzete u obzir u normi HRN EN 1993–1–2 te da je potrebno razmisliti o novom pristupu problemu deformacija od puzanja kod metalnih konstrukcija izloženih djelovanju požara.

5 Zaključak

U radu je izložena usporedba osnovnih parametara koji predstavljaju mehanička i deformacijska svojstva betona, čelika, aluminija i drva u požarnim uvjetima koji su uzeti iz europskih normi te iz dostupnih eksperimentalnih ispitivanja. Pokazano je da mehanička svojstva iz normi predstavljaju dobru procjenu proračunskog mehaničkog svojstva te je time dokazana pouzdanost kodificiranih parametara iz Eurokoda 3. U posebnom poglavlju dan je primjer rezultata znanstvenog projekta koji se bavio ispitivanjem adekvatnosti norme HRN EN 1993–1–2 u slučaju pojave deformacija od puzanja tijekom požara, gdje je pokazano da tu normu treba dopuniti uzimajući u obzir navedeni fenomen. Osim toga, treba provoditi nova znanstvena istraživanja i projekte u kojima bi se testirala pouzdanost pojedinih požarnih parametara iz ostalih normi kako bi se općenito povećala razina pouzdanosti suvremenih građevnih normi.

Literatura

- [1] HRN EN1992–1–2: 2013, Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara
- [2] Chen, C.L., Chen, L.: Experimental Study of Mechanical Properties of Normal–strength Concrete Exposed to High Temperatures at an Early Age, *Fire Safety Journal*, 44 (2009) M, pp. 997–1002.
- [3] Lie, T.T., Rowe, T.J., Lin, T.D.: Residual Strength of Fire Exposed RC Columns Evaluation and Repair of Fire Damage to Concrete, Detroit: American Concrete Institute, pp. 153–174, 1986.
- [4] Li, L., Purkiss, J.A.: Stress–strain Constitutive Equations of Concrete Material at Elevated Temperatures, *Fire Safety Journal*, 40 (2005), pp. 669–686.
- [5] HRN EN1993–1–2: 2008, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – Dio 1–2: Opća pravila – Proračun konstrukcija na djelovanje požara
- [6] Phan, L.T., McAllister, T.P., Gross, L.J.: Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings, NISTIR 7563, Draft version, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research laboratory, 2009.
- [7] Boko, I., Torić, N., Peroš, B.: Analiza otpornosti čeličnih konstrukcija u požaru, *Građevinar* 64 (2012) 8, pp. 631–640.
- [8] Hertz, K.D.: Reinforcement Data for Fire Safety Design, *Magazine of Concrete Research*, 56 (2004) 8, pp. 453–459.
- [9] Outinen, J., Kaitila, O., Mäkeläinen, P.: A Study for the Development of the Design of Steel Structures in Fire Conditions, *Proceedings of the first International Workshop Structures in Fire*, 19.–20. June, Copenhagen, pp. 267–281, 2000.

- [10] HRN EN1999–1–2: 2018, Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija – Dio 1–2: Proračun konstrukcija na djelovanje požara
- [11] Torić, N., Brnić, J., Boko, I., Brčić, M., Burgess, I.W., Uzelac, I.: Experimental Analysis of the Behaviour of Aluminium Alloy EN6082 AW T6 at High Temperature, *Metals* 7 (2017) 4, pp. 126, <https://doi.org/10.3390/met7040126>
- [12] Kaufman, J.G.: Properties of aluminium alloys – Tensile, creep and fatigue data at high and low temperatures, ASM International, 1999.
- [13] Voorhees, H.R., Freeman, J.W.: Report on the elevated–temperature properties of aluminium and magnesium alloys, American Society of Testing Materials, STP No. 291, 1960.
- [14] Essem, G.: Aluminium data 8–61, Hållfasthet vid hög und låg temperatur, samt andre dana, 1975.
- [15] Langhelle, N.K.: Experimental validation and calibration of nonlinear finite element models for use in design of aluminium structures exposed to fire, PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, ISBN 82–471–0376–1, 1999.
- [16] Maljaars, J., Soetens, F., Snijder, H.H.: Local buckling of aluminium structures exposed to fire Part 2: Finite element models, *Thin-Walled Structures*, 47 (2009), pp 1418–1428.
- [17] HRN EN1995–1–2: 2013, Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija – Dio 1–2: Općenito – Proračun konstrukcija na djelovanje požara