

# Optimalni izbor legure za aluminijske konstrukcije izložene požaru

---

**Boko, Ivica; Skejić, Davor; Torić, Neno; Čolić, Antonela**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2024, 72, 225 - 235**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.14256/JCE.2853.2019>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:040457>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-07**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 26.11.2019.

Ispravljen / Corrected: 18.1.2020.

Prihvaćen / Accepted: 15.3.2020.

Dostupno online / Available online: 10.4.2020.

# Optimalni izbor legure za aluminijske konstrukcije izložene požaru

## Autori:

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

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

[ivica.boko@gradst.hr](mailto:ivica.boko@gradst.hr)

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Davor Skejić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

[davor.skejic@grad.unizg.hr](mailto:davor.skejic@grad.unizg.hr)Izv.prof.dr.sc. **Neno Torić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

[neni.toric@gradst.hr](mailto:neni.toric@gradst.hr)**Antonela Čolić**, dipl.ing.građ.

The University of Edinburgh

BRE Centre for Fire Safety Engineering (IMFSE)

[colicantonela7@gmail.com](mailto:colicantonela7@gmail.com)

Pregledni rad

**Ivica Boko, Davor Skejić, Neno Torić, Antonela Čolić**

## Optimalni izbor legure za aluminijske konstrukcije izložene požaru

U radu su prikazane analitičke metode proračuna požarne otpornosti aluminijskih konstrukcija koje su usvojene u (HRN) EN 1999-1-2. Budući da aluminij kao materijal više gubi mehanička svojstva pri nižim temperaturama nego li čelik, ispravan odabir aluminijske legure u smislu minimalnog smanjenja mehaničkih svojstava je bitan za zadovoljavanje požarnih uvjeta. Radi objašnjenja utjecaja odabira aluminijske legure s obzirom na dobivanje optimalne požarne otpornosti, prikazana je parametarska analiza u kojoj je demonstriran utjecaj aluminijske legure na proračunsku požarnu otpornost nosivog aluminijskog stupa.

### Ključne riječi:

aluminij, temperiranje, požar, EN 1999-1-2, nosivost na visokim temperaturama

Subject review

**Ivica Boko, Davor Skejić, Neno Torić, Antonela Čolić**

## An optimum selection of alloy for aluminium structures exposed to fire

Analytical methods for calculating fire resistance of aluminium structures, specified in (HRN) EN 1999-1-2, are presented in the paper. Since aluminium as a material loses its mechanical properties at lower temperatures compared to steel, the correct selection of aluminium alloy in terms of minimal reduction of mechanical properties is essential for satisfying fire-related requirements. For clarifying the influence of selecting aluminium alloy for obtaining an optimum fire resistance, a parametric analysis is presented to demonstrate the influence of aluminium alloy on the design fire resistance of a load-bearing aluminium column.

### Key words:

aluminium, tempering, fire, EN 1999-1-2, high-temperature capacity

Übersichtsarbeit

**Ivica Boko, Davor Skejić, Neno Torić, Antonela Čolić**

## Optimale Auswahl der Legierung für feuergefährdete Aluminiumkonstruktionen

In der Abhandlung werden analytische Methoden zur Berechnung der Feuerbeständigkeit von Aluminiumkonstruktionen dargestellt, die in (HRN) EN 1999-1-2 übernommen wurden. Da Aluminium als Material bei niedrigen Temperaturen mehr mechanische Eigenschaften verliert als Stahl, ist die richtige Auswahl der Aluminiumlegierung im Hinblick auf eine minimale Verringerung der mechanischen Eigenschaften wichtig, um die Brandbedingungen zu erfüllen. Um den Einfluss der Auswahl der Aluminiumlegierung auf die Erzielung eines optimalen Feuerwiderstandes zu erklären, wird eine parametrische Analyse dargestellt, in welcher der Einfluss der Aluminiumlegierung auf die berechnete Feuerbeständigkeit der tragenden Aluminiumsäule demonstriert wird.

### Schlüsselwörter:

Aluminium, Temperierung, Feuer, EN 1999-1-2, Tragfähigkeit bei hohen Temperaturen

## 1. Uvod

Aluminij je uz čelik drugi najvažniji metal za izradu nosivih konstrukcija u građevinarstvu. Povoljne karakteristike aluminija za građevinsku praksu u izgradnji konstrukcija kao što su manja težina materijala u odnosu na čelik (približno tri puta manja), velika čvrstoća osnovnog materijala (čvrstoća aluminija usporediva s klasičnim legurama čelika S235 i S275), mogućnost istiskivanja (*eng.* extruded) optimalnog oblika poprečnog presjeka te poboljšana trajnost čine aluminij primjenjivim u konstrukcijama većih raspona i u situacijama u praksi kad je potrebno minimizirati vlastitu težinu konstrukcije. Aluminijske legure su tek tijekom dvadesetog stoljeća doživjele konkretnu primjenu u nosivim konstrukcijama u građevinarstvu [1, 2]. Jedan od razloga koji je odgodio primjenu aluminija u građevinarstvu jest kasna implementacija aluminija u suvremene europske norme – Eurokod, gdje su pravila za projektiranje aluminijskih konstrukcija implementirana među zadnjima.

Sobzirom na složenije ponašanje materijala pri izlaganju vanjskim djelovanjima u odnosu na čelik, konstrukcije iz aluminijskih legura predmet su intenzivnih znanstvenih istraživanja u svijetu i regiji [3, 4]. Poseban problem u građevinskoj praksi predstavlja ponašanje aluminija u uvjetima visokih temperatura – požara. S obzirom na aktualnost znanstvenih istraživanja o ponašanju aluminija u požaru na svjetskoj razini [5–7], istraživanja ponašanja aluminijskih legura i konstrukcijskih elemenata u požarnim uvjetima predmet su istraživanja i u Republici Hrvatskoj [8–10].

Aluminijske konstrukcije su osjetljive na djelovanje visokih temperatura zbog visoke vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti ( $>100 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) i niske temperature tališta materijala (između  $560\text{--}660^\circ\text{C}$ ) [5–7]. Kod aluminijskih legura značajno je izražena degradacija mehaničkih karakteristika na temperaturama većim od  $200^\circ\text{C}$ . Općenito, toplinski kapacitet aluminija (izražen kao umnožak volumne mase i specifičnog toplinskog kapaciteta) niži je u odnosu na toplinski kapacitet čelika primarno zbog tri puta manje volumne mase aluminija, što predstavlja dodatni razlog zašto se aluminij brže zagrijava u odnosu na čelik. Viša vrijednost toplinske vodljivosti uzrokuje brže zagrijavanje aluminija u odnosu na čelik, a niska temperatura tališta uzrokuje povećanu osjetljivost aluminija na puzanje što je i bila inicijalna motivacija za istraživanja započeta u Republici Hrvatskoj. Sadašnja istraživanja u Republici Hrvatskoj u području ponašanja aluminija u požaru odnose se na analizu vremenski ovisnih deformacija (puzanje) koje se javljaju ako su prisutni određeni termo–mehanički rubni uvjeti istraživani u nizu znanstvenih radova [8–10]. Spomenuta istraživanja su pokazala osjetljivost aluminijskih stupova na problem puzanja te kvantificirala njihovu otpornost na puzanje izraženu kao ukupno vrijeme u kojem aluminijski stupovi zadržavaju nosivost pri određenom nivou temperature i iskorištenosti elementa. Osim požarnih temperatura u aluminijskim legurama pojavljuje se i problem prilikom unošenja visokih temperatura zavarivanjem, što rezultira smanjenjem mehaničkih svojstava i omekšanjem

materijala u području zavarivanja, odnosno u području utjecaja topline.

Prema građevinskoj regulativi, određivanje pouzdanosti nosivih konstrukcija u slučaju djelovanja požara jedan je od bitnih zahtjeva za građevinu. Svako nekontrolirano gorenje zbog kojeg može doći do ozljeđivanja ljudi i uništenja materijalnih dobara naziva se požar, koji se prema novim propisima u hrvatskom graditeljstvu (Tehnički propis za građevinske konstrukcije NN 17/2017) ubraja u jedno od ekstremnih djelovanja na konstrukciju. Određivanje otpornosti nosivih aluminijskih konstrukcija u slučaju djelovanja visokih požarnih temperatura dano je normom HRN EN 1999–1–2 [11]. Upravo je na europskoj razini u tijeku revizija sadašnjeg Eurokoda, odnosno radi se na izradi druge generacije europskih normi za aluminijske konstrukcije [7]. Problematiku pojave i djelovanja požara u građevini s aspekta pouzdanosti može se definirati na dvije razine i to:

- prva razina: mjerama i smjernicama zaštite ljudi i imovine od požara (dojava vatre, sigurnosni putevi, zone djelovanja vatre, kontrola vatre i dima – mreža sprinklera i hidranata) – parametri arhitektonskog projektiranja
- druga razina: analiza pouzdanosti nosivih konstrukcija u slučaju djelovanja požara – izvanredno djelovanje na konstrukciju.

Iz svega navedenog vidljivo je da posebnu pažnju treba posvetiti projektiranju aluminijskih konstrukcija izloženih djelovanju požara što, zajedno s očitim nedostatkom literature u ovom području, predstavlja motivaciju za pisanje ovog rada. Zbog postojanja izuzetno velikog broja, naizgled vrlo sličnih, aluminijskih legura, odnosno temperiranja koje uzrokuje velike raspone mehaničkih svojstava nazivno 'istih' legura, izuzetno je bitno napraviti optimalni odabir u pogledu ponašanja na visokim temperaturama. Zbog toga je i cilj ovog rada upravo analiza utjecaja izbora legure, odnosno njihovog temperiranja, na požarnu otpornost aluminijske konstrukcije.

## 2. Svojstva aluminijskih legura na povišenim temperaturama

### 2.1. Mehanička svojstva

Prilikom određivanja otpornosti konstrukcija iz aluminijskih legura uslijed djelovanja požara, proračunske vrijednosti mehaničkih svojstava materijala  $X_{r,d}$  prema HRN EN 1999–1–2:2015 definirane su izrazom (1) na sljedeći način:

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

gdje je:

$k_{\theta}$  – faktor smanjenja čvrstoće ili svojstva deformiranja ( $X_{k,\theta}/X_k$ ) ovisan o temperaturi materijala

$X_k$  – karakteristična čvrstoća ili svojstvo deformiranja (općenito  $f_k$  ili  $E_k$ ) za proračun pri uobičajenoj temperaturi u skladu s HRN EN 1999–1–2:2015

$X_{k,\theta}$  – vrijednost svojstva materijala u proračunu na djelovanje požara, općenito ovisno o temperaturi materijala  
 $\gamma_{M,fi}$  – parcijalni faktor za požarnu situaciju za mehanička svojstva aluminijske legure.

Proračunske vrijednosti toplinskih svojstava materijala aluminijskih legura  $X_{fi,d}$  definirane su na sljedeći način:

– ako je porast svojstva povoljan za sigurnost, onda prema izrazu (2):

$$X_{fi,d} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2)$$

– ako je porast svojstva nepovoljan za sigurnost, onda prema izrazu (3):

$$X_{fi,d} = \gamma_{M,fi} \cdot X_{k,\theta} \quad (3)$$

Vrijednost parcijalnog faktora sigurnosti za požarnu situaciju prema [12] iznosi  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ . Za izloženost nosivih elemenata od aluminijskih legura toplinskom djelovanju do dva sata, dogovorne granice popuštanja pri 0,2 postotnoj trajnoj deformaciji na povišenoj temperaturi određuju se iz izraza (4):

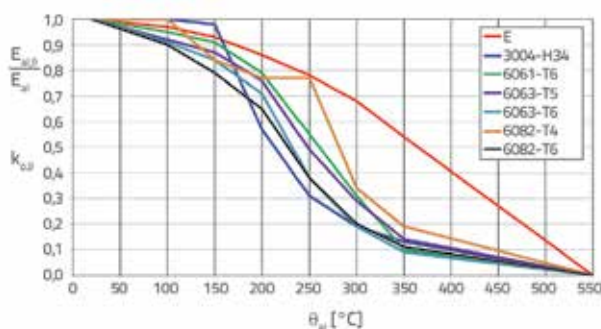
$$f_{o,\theta} = k_{o,\theta} \cdot f_o \quad (4)$$

gdje je:

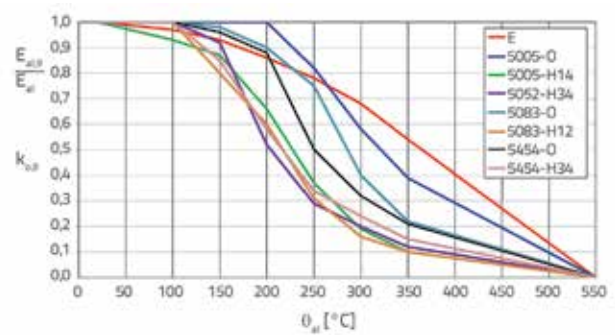
$f_{o,\theta}$  – dogovorna granica popuštanja pri 0,2–postotnoj trajnoj deformaciji pri povišenoj temperaturi,

$f_o$  – dogovorna granica popuštanja pri 0,2–postotnoj trajnoj deformaciji pri atmosferskoj temperaturi prostorije.

U izrazu (4) za određivanje  $f_{o,\theta}$  prema [11] koristi se faktor smanjenja dogovorne granice popuštanja pri 0,2–postotnoj trajnoj deformaciji, dok prilikom analize konstrukcija za određivanje krutosti pojedinog elementa potrebno je također uzeti smanjeni modul elastičnosti na povišenoj temperaturi uz pomoć faktora smanjenja. Grafički prikaz smanjenja dogovorne granice popuštanja pri 0,2–postotnoj trajnoj deformaciji i smanjenja modula elastičnosti za aluminijske legure pri povišenoj temperaturi prema [11] prikazane su na slikama 1. i 2.



Slika 1. Omjeri granice popuštanja  $k_{o,\theta}$  i modula elastičnosti  $E = E_{al,\theta}/E_{al}$  aluminijske legure EN-AW 3004 i legura 6xxx pri povišenoj temperaturi  $\theta_{al}$  [°C] za vrijeme izloženosti toplini do dva sata [11]



Slika 2. Omjeri granice popuštanja  $k_{o,\theta}$  i modula elastičnosti  $E = E_{al,\theta}/E_{al}$  aluminijskih legura 5xxx pri povišenoj temperaturi  $\theta_{al}$  [°C] za vrijeme izloženosti toplini do dva sata [11]

Relativno toplinsko izduženje (deformacija) aluminijskih legura  $\Delta L/L$  za  $0^\circ\text{C} < \theta_{al} < 500^\circ\text{C}$  određuje se iz izraza (5):

$$\frac{\Delta L}{L} = 0,1 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_{al}^2 + 22,5 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_{al} - 4,5 \cdot 10^{-4} \quad (5)$$

gdje je:

$L$  – duljina pri 20 °C,

$\Delta L$  – izdulženost prouzročena temperaturom.

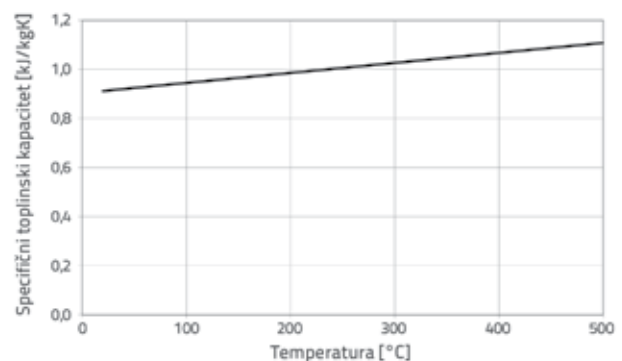
## 2.2. Toplinska svojstva

Razvoj temperatura u bilo kojem materijalu, pa tako i u aluminiju ovisi o toplinskim svojstvima tog materijala: specifičnom toplinskom kapacitetu i koeficijentu toplinske vodljivosti.

Specifični toplinski kapacitet  $c_{al}$  aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi  $0^\circ\text{C} < \theta_{al} < 500^\circ\text{C}$  izračunava se prema izrazu (6) [11]:

$$c_{al} = 0,41 \cdot \theta_{al} + 903 \quad (6)$$

Grafički prikaz specifičnog toplinskog kapaciteta  $c_{al}$  u ovisnosti o temperaturi dan je na slici 3.



Slika 3. Specifični toplinski kapacitet aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi [11]

Koeficijent toplinske vodljivosti aluminijskih legura  $\lambda_{al}$  za  $0\text{ °C} < \theta_{al} < 500\text{ °C}$  za pojedine skupine aluminijskih legura određuje se izrazima (7) i (8), prema [11]:

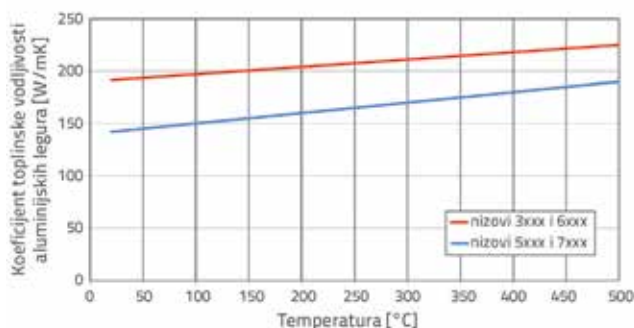
- za legure nizova 3xxx i 6xxx:

$$\lambda_{al} = 0,07 \cdot \theta_{al} + 190 \text{ [W/mK]} \quad (7)$$

- za legure nizova 5xxx i 7xxx:

$$\lambda_{al} = 0,1 \cdot \theta_{al} + 140 \text{ [W/mK]} \quad (8)$$

Grafički prikaz koeficijenta toplinske vodljivosti aluminijskih legura  $\lambda_{al}$  u ovisnosti o temperaturi dan je na slici 4.



Slika 4. Koeficijent toplinske vodljivosti aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi [11]

### 3. Proračun aluminijskih elemenata prema HRN EN 1999–1–2

Aluminij je kao i čelik nezapaljiv materijal. Djelovanje požara na aluminijske elemente očituje se isključivo degradacijom mehaničkih svojstava materijala. Određivanje otpornosti aluminijskih konstrukcija u slučaju požara dano je normom HRN EN 1999–1–2. Prisilna i ograničena širenja i deformiranja uzrokovana promjenama temperature zbog izloženosti požaru imaju kao posljedicu učinke djelovanja, odnosno sile i momente, koji se moraju uzeti u obzir prilikom analize konstrukcija, osim u slučajevima:

- kada mogu biti unaprijed prepoznata kao zanemariva ili pak s povoljnim učinkom,
- kada su obuhvaćena konzervativno odabranim modelima oslanjanja i rubnim uvjetima i/ili su implicitno uzeti u obzir konzervativno određenim zahtjevima požarne sigurnosti.

Za određivanje neizravnih djelovanja na nosive elemente treba uzeti u obzir sljedeće:

- spriječeno toplinsko širenje samih elemenata, primjerice stupova u višekratnim okvirnim konstrukcijama s krutim zidovima,
- različito toplinsko širenje elemenata statički neodređenih konstrukcija, primjerice kontinuiranih elemenata,
- toplinske gradijente u poprečnom presjeku koji uzrokuju unutarnja naprezanja,

- toplinsko širenje susjednih elemenata, primjerice pomak vrha stupa zbog širenja stropne ploče ili širenje ovješene užadi,
- toplinsko širenje elemenata koje utječe na ostale elemente izvan požarnog odjeljka.

Požarnu otpornost nosive aluminijske konstrukcije treba odrediti pomoću jednog ili pomoću više pristupa, i to:

- jednostavnim proračunskim modelima,
- naprednim proračunskim modelima,
- ispitivanjem.

Jednostavni proračunski modeli su pojednostavnjene proračunske metode pojedinačnih elemenata utemeljene na konzervativnim pretpostavkama, a napredni su proračunski modeli proračunske metode u kojima su inženjerska načela primijenjena realno za određene primjene.

#### 3.1. Jednostavni modeli proračuna

Pretpostavlja se da je nosiva funkcija aluminijske konstrukcije ili konstrukcijskog elementa održana nakon vremena  $t$  u danom požaru ako je:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (9)$$

gdje je:

$E_{fi,d}$  – proračunski učinak djelovanja za požarnu proračunsku situaciju određen u skladu s normom HRN EN 1991–1–2, izražen preko reznih sila pojedinačno ili u zajedničkom djelovanju,

$R_{fi,d,t}$  – proračunska otpornost aluminijske konstrukcije ili konstrukcijskoga elementa za požarnu proračunsku situaciju u vremenu  $t$  izražena preko reznih sila pojedinačno ili u zajedničkom djelovanju.

Razredba poprečnih presjeka iz aluminijskih legura može se provesti kao i u proračunima pri atmosferskoj temperaturi. Ovaj princip temelji se na istom relativnom padu vrijednosti dogovorne granice popuštanja pri 0,2–postotnoj trajnoj deformaciji i modula elastičnosti. Uzme li se u obzir stvarni pad modula elastičnosti na određenoj temperaturi, a kod većine aluminijskih legura veći je pad dogovorne granice popuštanja od modula elastičnosti, proračunom se može dobiti veća vrijednost sposobnosti rotacije presjeka, odnosno niži razred presjeka. Prema [12], razredba poprečnih presjeka u požarnoj proračunskoj situaciji ista je kao i u proračunu pri uobičajenim temperaturama.

Proračunska otpornost  $N_{fi,t,Rd}$  vlačno opterećenog elementa s nejednolikom raspodjelom temperature po poprečnom presjeku u vremenu  $t$  određuje se iz izraza (10):

$$N_{fi,t,Rd} = \sum A_i k_{o,0,i} \frac{f_o}{\gamma_{M,fi}} \quad (10)$$

gdje je:

$A_i$  – površina elementarne površine neto poprečnoga presjeka temperature  $\theta_i$  uključujući odbitak kojim se uzima u obzir učinak omekšanja HAZ–a, ako se to zahtijeva. Smanjenje se temelji na smanjenoj debljini  $\rho_{o, haz} \cdot t$

$k_{o, \theta_i}$  – omjer smanjenja proračunske granice popuštanja pri temperaturi  $\theta_i$ . Vrijednost  $\theta_i$  je temperatura elementarne površine  $A_i$

$f_o$  – dogovorna granica popuštanja pri trajnoj deformaciji od 0,2 %

$\gamma_{M, fi}$  – parcijalni faktor otpornosti aluminijskih legura za požarnu situaciju.

Proračunska vlačna otpornost poprečnoga presjeka iz aluminijskih legura, za požarnu proračunsku situaciju s jednolikom raspodjelom temperature po poprečnom presjeku  $\theta_{av}$ ,  $N_{fi, t, Rd}$  proračunava se prema izrazu (11):

$$N_{fi, t, Rd} = k_{o, \theta} N_{Rd} \frac{\gamma_{Mx}}{\gamma_{M, fi}} \quad (11)$$

gdje je:

$N_{Rd}$  – proračunska vlačna otpornost poprečnoga presjeka iz aluminijskih legura za proračun uz uobičajenu temperaturu,

$\gamma_{Mx}$  – parcijalni faktor u skladu s normom HRN EN 1999–1–1:2015.

Za elemente od aluminijskih legura izložene djelovanju uzdužne vlačne sile s jednolikom ili nejednolikom raspodjelom temperature po poprečnom presjeku u vremenu  $t$  treba biti zadovoljeno:

$$\frac{N_{fi, Ed}}{N_{fi, t, Rd}} \leq 1,0 \quad (12)$$

gdje je:

$N_{fi, Ed}$  – proračunska uzdužna sila kao učinak djelovanja za požarnu proračunsku situaciju

$N_{fi, t, Rd}$  – proračunska vlačna otpornost poprečnog presjeka za požarnu proračunsku situaciju.

Tlačni elementi (elementi opterećeni centričkom tlačnom silom) od aluminijskih legura s jednolikom ili nejednolikom raspodjelom temperature po poprečnom presjeku u vremenu  $t$  mogu se provjeriti na izvijanje prema izrazu (13):

$$\frac{N_{fi, Ed}}{N_{b, fi, t, Rd}} \leq 1,0 \quad (13)$$

gdje je:

$N_{fi, Ed}$  – proračunska uzdužna sila kao učinak djelovanja za požarnu proračunsku situaciju

$N_{b, fi, t, Rd}$  – proračunska otpornost tlačnog elementa na izvijanje za požarnu proračunsku situaciju.

Proračunska otpornost tlačnog elementa od aluminijskih legura na izvijanje  $N_{b, fi, t, Rd}$  u vremenu  $t$  određuje se prema izrazu (14):

$$N_{b, fi, t, Rd} = k_{o, \theta \max} N_{b, Rd} \frac{\gamma_{M1}}{1,2 \gamma_{M, fi}} \quad (14)$$

gdje je:

$N_{b, Rd}$  – otpornost elementa na izvijanje u proračunu za uobičajenu temperaturu,

1,2 – faktor smanjenja proračunske otpornosti zbog puzanja aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi u promatranom konstrukcijskom elementu.

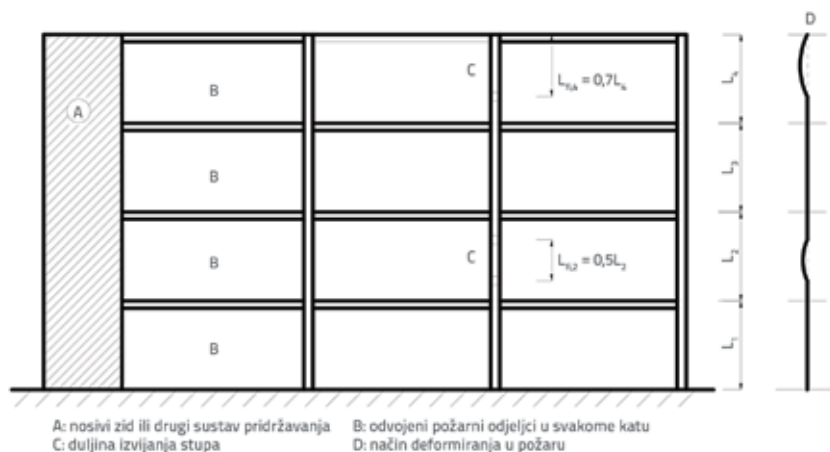
Relativne vitkosti elemenata od aluminijskih legura kao i duljine izvijanja stupova  $L_{fi}$  određuju se kao i za atmosferske temperature. Stup na promatranj razini (etaži), kontinuirano spojen (nepopustljivi spojevi) sa stupovima iznad i ispod sebe, ako oni postoje, smatra se učinkovito pridržanim ako je požarna otpornost elemenata zgrade koji odvajaju promatrane razine najmanje jednaka požarnoj otpornosti stupa. Za pridržani okvir (eng. braced frame) kod kojega svaki kat obuhvaća posebni požarni odjeljak dovoljne požarne otpornosti duljina izvijanja stupa nekog međukata  $L_{fi}$  može se uzeti  $L_{fi} = 0,5 \cdot L$ , a na zadnjem katu  $L_{fi} = 0,7 \cdot L$ , gdje je  $L$  sustavna duljina odgovarajućega kata, prikazano na slici 5.

Za elemente od aluminijskih legura izložene momentu savijanja s jednolikom ili nejednolikom raspodjelom temperature po poprečnom presjeku u vremenu  $t$  treba biti zadovoljeno:

$$\frac{M_{fi, Ed}}{M_{fi, t, Rd}} \leq 1,0 \quad (15)$$

gdje je:

$M_{fi, Ed}$  – proračunska vrijednost momenta savijanja kao učinak djelovanja za požarnu proračunsku situaciju



Slika 5. Primjeri duljine izvijanja  $L_{fi}$  u pridržanim okvirima [11]

$M_{fi,Rd}$  – proračunska vrijednost otpornosti poprečnog presjeka na savijanje za požarnu proračunsku situaciju.

Proračunska otpornost na savijanje  $M_{fi,t,Rd}$  poprečnoga presjeka razreda 1. ili 2. za nejednoliku raspodjelu temperature po presjeku u vremenu  $t$  određuje se prema izrazu (16):

$$M_{fi,t,Rd} = \sum A_i z_i k_{o,\theta,i} \frac{f_o}{\gamma_{M,fi}} \quad (16)$$

gdje je:

- $A_i$  – površina elementarne površine neto poprečnoga presjeka temperature  $\theta_i$  uključujući odbitak kojim se uzima u obzir učinak omekšavanja HAZ-a, ako se to zahtijeva. Smanjenje se temelji na smanjenoj debljini  $\rho_{o,haz} \cdot t$
- $z_i$  – udaljenost plastične neutralne osi od težišta elementarne površine  $A_i$
- $k_{o,\theta,i}$  – omjer smanjenja proračunske granice popuštanja pri temperaturi  $\theta_i$ . Vrijednost  $\theta_i$  je temperatura elementarne površine  $A_i$
- $\gamma_{M,fi}$  – parcijalni faktor otpornosti aluminijskih legura za požarnu situaciju.

Proračunski moment otpornosti na savijanje  $M_{fi,t,Rd}$  poprečnoga presjeka razreda 3. ili 4. za nejednoliku raspodjelu temperature u vrijeme  $t$  određuje se prema izrazu (17):

$$M_{fi,t,Rd} = k_{o,\theta} M_{Rd} \frac{\gamma_{Mx}}{\gamma_{M,fi}} \quad (17)$$

gdje je:

- $k_{o,\theta_{max}}$  – omjer granice popuštanja aluminijskih legura pri temperaturi  $\theta_{al}$  jednak maksimalnoj temperaturi  $\theta_{al,max}$  poprečnoga presjeka dostignutoj u vremenu  $t$ ,
- $M_{Rd}$  – moment otpornosti poprečnoga presjeka za proračun uobičajene temperature za razred 3. i 4.,
- $\gamma_{Mx}$  – parcijalni faktor.  $\gamma_{M1}$  se primjenjuje u kombinaciji s  $M_{c,Rd}$  za atmosfersku temperaturu, a  $\gamma_{M2}$  u kombinaciji s  $M_{u,Rd}$  za atmosfersku temperaturu.

Proračunska otpornost na savijanje  $M_{fi,t,Rd}$  poprečnoga presjeka razreda 1., 2., 3. ili 4. za jednoliku raspodjelu temperature u vremenu  $t$  određuje se prema izrazu (18):

$$M_{fi,t,Rd} = k_{o,\theta} M_{Rd} \frac{\gamma_{Mx}}{\gamma_{M,fi}} \quad (18)$$

gdje je:

- $M_{Rd}$  – moment otpornosti poprečnoga presjeka za proračun za uobičajenu temperaturu,
- $\gamma_{Mx}$  – parcijalni faktor.  $\gamma_{M1}$  se primjenjuje u kombinaciji s  $M_{c,Rd}$  za atmosfersku temperaturu, a  $\gamma_{M2}$  u kombinaciji s  $M_{u,Rd}$  za atmosfersku temperaturu.

Za grede od aluminijskih legura izložene bočnotorzijskom izvijanju proračunska otpornost na savijanje pri izvijanju  $M_{b,fi,t,Rd}$

bočno nepridržane grede u vremenu  $t$  određuje se prema izrazu (19):

$$M_{b,fi,t,Rd} = k_{o,\theta_{max}} M_{b,Rd} \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M,fi}} \quad (19)$$

gdje je:

- $M_{b,Rd}$  – proračunski moment otpornosti pri bočno-torzijskom izvijanju za proračun uz atmosfersku temperaturu.

Za elemente iz aluminijskih legura izložene djelovanju poprečne sile s jednolikom ili nejednolikom raspodjelom temperature po poprečnom presjeku u vremenu  $t$  treba biti zadovoljeno:

$$\frac{V_{fi,Ed}}{V_{fi,t,Rd}} \leq 1,0 \quad (20)$$

gdje je:

- $V_{fi,Ed}$  – proračunska vrijednost poprečne sile kao učinak djelovanja za požarnu proračunsku situaciju,
- $V_{fi,t,Rd}$  – proračunska vrijednost otpornosti poprečnog presjeka na poprečnu silu za požarnu proračunsku situaciju.

Proračunska otpornost grede na djelovanje poprečne sile  $V_{fi,t,Rd}$  u vremenu  $t$  određuje se prema izrazu (21):

$$V_{fi,t,Rd} = k_{o,\theta} V_{Rd} \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M,fi}} \quad (21)$$

gdje je:

- $k_{o,\theta}$  – omjer granice popuštanja aluminijskih legura pri temperaturi  $\theta_{al}$ , gdje je  $\theta_{al}$  maksimalna temperatura onoga dijela poprečnoga presjeka koji nosi poprečnu silu
- $V_{Rd}$  – otpornost na djelovanje poprečne sile neto poprečnoga presjeka za proračun uz atmosfersku temperaturu.

Pri određivanju vrijednosti toka topline po jedinici površine  $\dot{h}_{net}$  prema HRN EN 1991-1-2:2012/Ispr.1:2014 potrebno je primijeniti sljedeće vrijednosti koeficijenta emisije površine elementa:

- $\varepsilon_m = 0,3$  za čiste nepokrivene površine konstrukcija iz aluminijskih legura,
- $\varepsilon_m = 0,7$  za obojene i pokrivene (npr. začađene) površine konstrukcija iz aluminijskih legura.

Usvojeni model proračuna nekog konstrukcijskoga sustava prema normi HRN EN 1999-1-2: 2015 mora odražavati očekivano ponašanje konstrukcije (konstrukcijskih elemenata i priključaka) u požaru. Za određivanje odgovarajućih reznih sila  $E_{fi,d,t}$  tijekom izloženosti požaru, mehanička djelovanja moraju se kombinirati u skladu s odredbama norme HRN EN 1990: 2011 za izvanredne proračunske situacije.

Za istovrijednu jednoliku raspodjelu temperature u poprečnom presjeku porast temperature  $\Delta\theta_{al(t)}$  u nezaštićenom elementu od aluminijskih legura tijekom promatranog vremenskog intervala  $\Delta t$  određuje se prema izrazu (22):

$$\Delta\theta_{al(t)} = k_{sh} \frac{1}{c_{al}\rho_{al}} \frac{A_m}{V} \dot{h}_{net} \Delta t \quad (22)$$

gdje je:

- $k_{sh}$  – popravni faktor za učinak zaklonjenosti,
- $A_m/V$  – faktor oblika profila za nezaštićene aluminijske elemente [ $m^{-1}$ ],
- $A_m$  – izložena površina elementa po jedinici dužine [ $m^2/m$ ],
- $V$  – volumen elementa po jedinici dužine [ $m^3/m$ ],
- $c_{al}$  – specifični toplinski kapacitet aluminijske legure [ $J/kgK$ ],
- $\rho_{al}$  – gustoća aluminijske legure [ $kg/m^3$ ],
- $\dot{h}_{net}$  – proračunska vrijednost neto toplinskog toka po jedinici površine određen prema HRN EN 1991-1-2:2012/Ispr.1:2014,
- $\Delta t$  – vremenski interval [s].

Popravni faktor za učinak zaklonjenosti kod I-profila određuje se iz izraza (23):

$$k_{sh} = 0,9 \frac{\left(\frac{A_m}{V}\right)_b}{\frac{A_m}{V}} \quad (23)$$

gdje je:

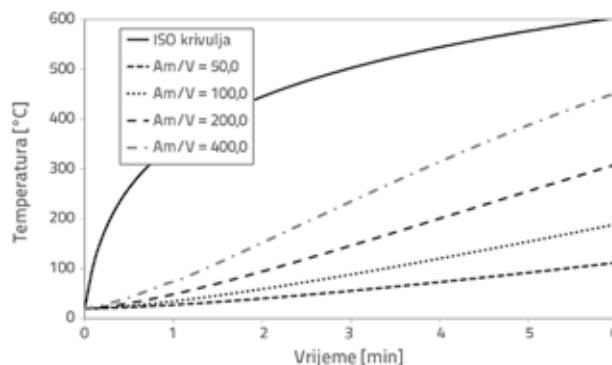
- $\left(\frac{A_m}{V}\right)_b$  – zamišljena vrijednost faktora profila (po obodu profila).

Za sve ostale oblike poprečnih presjeka vrijednosti  $k_{sh}$  uzimaju se:

$$k_{sh} = \frac{\left(\frac{A_m}{V}\right)_b}{\frac{A_m}{V}} \leq 1,0 \quad (24)$$

Za poprečne presjeke konveksnoga oblika (npr. pravokutne ili kružne šuplje poprečne presjeke), potpuno obuhvaćene djelovanjem požara, učinak zaklonjenosti ima beznačajan utjecaj pa je stoga popravni faktor  $k_{sh} = 1$ . Zanemarenje učinka zaklonjenosti (tj.  $k_{sh} = 1,0$ ) daje rješenja na strani veće sigurnosti. Na slici 6. prikazana je analiza provođenja topline u nezaštićenom aluminijskom elementu uz primjenu izraza (22) za različite vrijednosti faktora oblika. Iz slike 6. vidljivo je da je prirast temperature u aluminijskom presjeku u slučaju izlaganja presjeka temperaturama koje odgovaraju ISO krivulji požara prvih 6 minuta značajan te da se presjek zagrijava na temperature na kojima dolazi do značajnijeg utjecaja na smanjenje mehaničke nosivosti. S obzirom na to, zaštita aluminijskih konstrukcija

vatrootpornim elementima je preporučljiva, pogotovo ako postoji mogućnost nastanka požara relativno blizu elemenata aluminijske konstrukcije.



Slika 6. Analiza provođenja topline u nezaštićenom aluminijskom elementu za različite vrijednosti faktora oblika

Provođenje topline u zaštićenim aluminijskim elementima određuje se iz izraza (25):

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \varphi / 3)} \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (25)$$

$$\varphi = \frac{c_p \rho_p d_p A_p / V}{c_a \rho_a}$$

gdje je:

- $c_p, \rho_p$  – specifični toplinski kapacitet [ $J/kgK$ ] i volumna masa protupožarne zaštite [ $kg/m^3$ ]
- $\lambda_p, d_p$  – koeficijent toplinske vodljivosti protupožarne zaštite [ $W/mK$ ] i debljina protupožarne zaštite [m]
- $A_p/V$  – faktor oblika za zaštićene poprečne presjeke [ $m^{-1}$ ]
- $\theta_{g,t}$  – temperatura na površini protupožarne zaštite [ $^{\circ}C$ ]
- $\theta_{a,t}$  – temperatura elementa iz prethodnog vremenskog intervala [ $^{\circ}C$ ].

### 3.2. Napredni modeli proračuna

Napredni modeli proračuna zasnivaju se na temeljnom fizikalnom ponašanju i na taj način daju pouzdano približenje očekivanoga ponašanja odgovarajućega dijela konstrukcije u požarnim uvjetima. Osim toga, trebaju uključiti proračunske modele za određivanje:

- razvoja i raspodjele temperature u konstrukcijskim elementima (modelom toplinskoga odziva),
- mehaničkoga ponašanja konstrukcije ili bilo kojega njezina dijela (modelom mehaničkoga odziva).

Napredni modeli proračuna smiju se upotrijebiti za svaku krivulju zagrijavanja (požarnu krivulju) ako su poznata svojstva materijala za odgovarajući raspon temperature. Osim toga, takvi se modeli mogu upotrijebiti za sve vrste poprečnih presjeka (nezaštićenih i zaštićenih).



Napredni modeli proračuna toplinskoga odziva trebaju se temeljiti na priznatim načelima i pretpostavkama teorije prelaska topline. Modelom toplinskoga odziva potrebno je razmotriti:

- odgovarajuća toplinska djelovanja određena u normi HRN EN 1991-1-2,
- promjene toplinskih svojstava materijala u ovisnosti o temperaturi.

Utjecaj količine vlage i kretanja vlage u požarnozaštitnom materijalu smije se zanemariti što daje konzervativno rješenje. Napredni modeli proračuna mehaničkoga odziva trebaju se temeljiti na priznatim načelima i pretpostavkama teorije mehanike konstrukcija uzimajući u obzir promjene mehaničkih svojstava materijala s temperaturom. Prilikom mehaničkih analiza potrebno je uzeti u obzir i učinke toplinski prouzročene deformacije i naprezanja zbog porasta i razlika temperature, kao i:

- kombinirane učinke mehaničkih i toplinskih djelovanja, te geometrijske nesavršenosti
- mehanička svojstva materijala ovisna o temperaturi
- nelinearne geometrijske učinke
- učinke nelinearnih svojstava materijala uključujući povoljne učinke opterećenja i rasterećenja na krutost konstrukcije.

Za temperature u metalnim elementima više od 170 °C i trajanje dulje od 30 minuta potrebno je u obzir uzeti učinke prolaznoga toplinskog pužanja. Deformiranja u graničnom stanju nosivosti određena proračunskom metodom trebaju se ograničiti kako bi se osiguralo održavanje spojivosti svih dijelova konstrukcije. U proračunu treba uzeti u obzir granično stanje nosivosti nakon kojega bi izračunana deformiranja konstrukcije mogla prouzročiti slom zbog gubitka prikladnog oslonca jednoga od elemenata. Proračun elemenata izloženih izvijanju može se provesti upotrebom početne nesavršenosti u obliku sinusoide uz najveću vrijednost u polovici visine u skladu s maksimalno dopuštenim otklonima određenim u normi HRN EN 1090-3.

## 4. Utjecaj odabira legure na požarnu otpornost aluminijskog tlačnog elementa

### 4.1. Opseg parametarskih analiza i način proračuna

Proračun se izvodi usporedno za tri tlačna elementa različitih duljina: 2,5, 3,0 i 3,5 m. Za sve elemente usvojen je istisnuti kvadratni cijevni profil istih vanjskih dimenzija (SHS 100x100), samo što je varirana debljina stijenke (4, 5 i 6 mm). Uz navedene geometrijske parametre, razmotrene su dvije legure koje se

često upotrebljavaju u građevinskoj praksi EN AW 6061-T4 i EN AW 6061-T6. Razmatrane legure su u osnovi iste osim što im se temperiranje prilikom proizvodnje, odnosno promjenom obrade (stanja), a time i ponašanje na visokim temperaturama, bitno razlikuje. Varijacijom navedenih parametara dobiveno je ukupno 18 kombinacija, tablica 1., koje će se pobliže analizirati.

Tablica 1. Parametri analiziranih tlačnih elemenata SHS 100x100x*t*

Oznaka	Debljina stijenke, <i>t</i> [mm]	Legura EN AW 6061-	Duljina, L [m]
01_4-T4-2,5	4	T4	2,5
02_4-T4-3,0			3,0
03_4-T4-3,5			3,5
04_4-T6-2,5		T6	2,5
05_4-T6-3,0			3,0
06_4-T6-3,5			3,5
07_5-T4-2,5	5	T4	2,5
08_5-T4-3,0			3,0
09_5-T4-3,5			3,5
10_5-T6-2,5		T6	2,5
11_5-T6-3,0			3,0
12_5-T6-3,5			3,5
13_6-T4-2,5	6	T4	2,5
14_6-T4-3,0			3,0
15_6-T4-3,5			3,5
16_6-T6-2,5		T6	2,5
17_6-T6-3,0			3,0
18_6-T6-3,5			3,5

Razredba poprečnog presjeka provedena je u skladu s [11, 13]. Zbog uobičajeno niske otpornosti aluminijskih elemenata na izvijanje u slučaju požara, [5-7], analiza je provedena za pretpostavljenu otpornost u trajanju od 5 minuta.

Analiza je provedena za požarni scenarij u skladu s ISO požarnom krivuljom [14]. Numerički proračun koji slijedi u skladu je s europskim normama [11, 14], a cilj je prikazati pad otpornosti različite kvalitete (ista legura, različito temperiranje) aluminijskog nosača za porast temperature. Za svako povećanje  $D_{q_{al(t)}}$  početne temperature  $q_{al}$  interpolira se vrijednost koeficijenta smanjenja  $k_{0,0}$  (tablica 2.) te se smanjuje otpornost dobivena za stup pri sobnoj temperaturi  $N_{b,Rd}$  ([15]) sa smanjenom duljinom izvijanja) te nova vrijednost otpornosti stupa iznosi  $N_{b,fi,Rd}$ .

Tablica 2. Vrijednosti koeficijenta smanjenja  $k_{0,0}$  ovisno temperaturi i temperiranju [11]

T [°C]	20	100	150	200	250	300	350	550
$k_{0,0,T4}$	1,00	0,90	0,75	0,50	0,23	0,11	0,06	0
$k_{0,0,T6}$	1,00	0,95	0,91	0,79	0,55	0,31	0,10	0

Početna temperatura  $\theta_{al} = 20$  °C za  $t = 0$  min inkrementalno se povećava za vrijednost  $\Delta\theta_{al(t)}$ . Razvoj, odnosno povećanje temperature za uniformnu distribuciju temperature kroz poprečni presjek u nezaštićenom aluminijskom elementu,  $\Delta\theta_{al(t)}$ , u nekom vremenskom intervalu možemo izračunati prema izrazu (11).

Za svaku novu dobivenu vrijednost temperature u aluminijskom elementu  $\theta_{al}$  smanjuje se početna otpornost elementa prema izrazu (12) u ovisnosti o  $k_{\theta_0}$  koji predstavlja omjer smanjenja proračunske granice popuštanja. Duljina izvijanja razmatranog tlačnog elementa u funkciji stupa između dvije međukatne konstrukcije,  $L_{cr}$ , za 50 % je manja u požarnoj situaciji [11]. Za slučaj požara može se u obzir uzeti promjena modula elastičnosti zbog promjene temperature. Promjena modula elastičnosti [5] određuje koeficijent  $\alpha_\theta$  koji, osim na vitkost,  $\bar{\lambda}$  utječe i na koeficijent  $e$  o kojem ovisi razredba poprečnog presjeka. Budući da je vrijednost  $\bar{\lambda}_\theta$  ustvari količnik  $\bar{\lambda}$  i  $\alpha_\theta$ , dobije se manja vitkost odnosno veća otpornost elementa na izvijanje. Ipak, navedena promjena modula elastičnosti se ovdje neće koristiti jer se za dokaz izvijanja, prema [11] i hrvatskom nacionalnom dodatku [12], proračunska otpornost stupa na izvijanje pri djelovanju požara određuje bez uzimanja povoljnijeg razreda poprečnog presjeka dobivenog primjenom smanjenog modula elastičnosti pa vrijedi  $\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda}$  samo za umanjenu duljinu izvijanja  $L_{cr}$ . Za proračun otpornosti elementa na izvijanje pri požaru uvodi se dodatni faktor smanjenja (1,2) koji uzima u obzir puzanje aluminijskih legura pri povišenim temperaturama.

## 4.2. Rezultati parametarskih analiza i rasprava

Sažetak parametarskih analiza prikazan je u tablici 3, gdje su dane otpornosti elementa na izvijanje ovisno o vremenu izloženosti požaru ( $t = 0, 2,5$  i  $5,0$  min). Uz spomenute vrijednosti dani su i omjeri otpornosti u nekom vremenu i početne otpornosti za  $t = 0$  min koji su jasan pokazatelj smanjenja otpornosti elementa u požaru. Napominje se da je  $N_{b,fi,t0,Rd}$  otpornost elementa na izvijanje za izvanrednu računsku požarnu situaciju u vremenu  $t = 0$  min te da se računa s dvostruko manjom duljinom izvijanja u odnosu na otpornost elementa na izvijanje za trajnu računsku situaciju ( $N_{b,Rd}$ ).

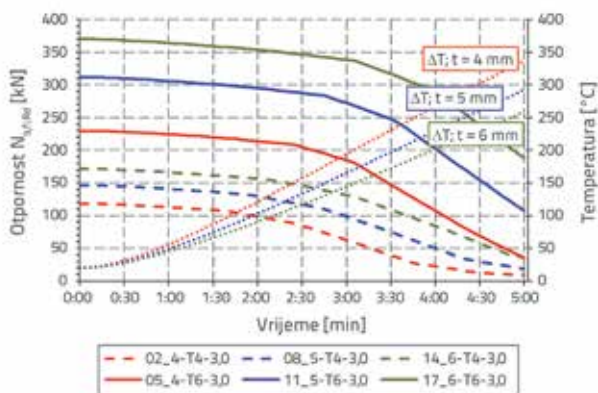
Za grupu elemenata duljine 3 metra na slici 7. prikazane su krivulje zagrijavanja elemenata i otpornosti na izvijanje i ovisno o vremenu izloženosti požaru. Punom linijom prikazane su otpornosti elemenata izrađenih od legure EN AW 6061-T6, a crtkanom su linijom prikazane otpornosti za elemente izrađene od EN AW 6061-T4. Točkastom linijom prikazano je i zagrijavanje SHS poprečnog presjeka ovisno o debljini stijenke ( $D$ ,  $t$ ). Krivulje za druge razmatrane duljine elemenata su analogne krivuljama prikazanim na slici 7.

Rezultati prikazani u tablici 3. pokazuju analogno ponašanje uzoraka različitih duljina, odnosno za isti presjek i leguru, odnosno temperiranje, elementa relativan pad otpornosti je jednak bez obzira na vitkost elementa. Za odnos legura unutar iste skupine s različitim temperiranjima T4, odnosno T6, čija je osnovna razlika u prirodi dozrijevanja nakon termičke obrade,

Tablica 3. Promjena tlačne otpornosti elementa ovisno o vremenu izloženosti požaru

Vrijeme	$t = 0,0$ min		$t = 2,5$ min		$t = 5,0$ min	
	Uzorak / Tlačna otpornost elementa	$N_{b,fi,t0,Rd}$ [kN]	$N_{b,fi,t2,5,Rd}$ [kN]	$N_{b,fi,t2,5,Rd} / N_{b,fi,t0,Rd}$ [%]	$N_{b,fi,t5,0,Rd}$ [kN]	$N_{b,fi,t5,0,Rd} / N_{b,fi,t0,Rd}$ [%]
01_4-T4-2,5	123	87,3	71	9	7	
02_4-T4-3,0	118	84,3		8,7		
03_4-T4-3,5	112	80,3		8,3		
04_4-T6-2,5	241	215	89	37,5	16	
05_4-T6-3,0	230	205		35,8		
06_4-T6-3,5	214	190		33,3		
07_5-T4-2,5	152	121	80	19,4	13	
08_5-T4-3,0	146	117		18,7		
09_5-T4-3,5	139	111		17,8		
10_5-T6-2,5	331	305	92	114	35	
11_5-T6-3,0	312	288		108		
12_5-T6-3,5	289	267		99,8		
13_6-T4-2,5	180	153	85	37,6	21	
14_6-T4-3,0	172	146		35,9		
15_6-T4-3,5	165	140		34,6		
16_6-T6-2,5	393	368	94	200	51	
17_6-T6-3,0	370	346		188		
18_6-T6-3,5	338	317		172		

već u trenutku  $t = 0$  min, legura EN AW 6061–T6 ima okvirno dvostruko veću tlačnu otpornost od legure EN AW 6061–T4. Ipak, kod legure EN AW 6061–T6 vidi se i veći utjecaj promjene debljine stijenke na otpornost u trenutku  $t = 0$  min jer je poprečni presjek uzorka koji ima debljinu stijenke 4 mm razreda 4, pa se za povećanje debljine stijenke na 5 mm primjećuje rast otpornosti za 36 % ( $N_{b,fi,t0,Rd}(11\_5-T6-3,0)/N_{b,fi,t0,Rd}(05\_4-T6-3,0) = 312/230$ ). Usporedbe radi, kod legure EN AW 6061–T4 isto povećanje debljine rezultira rastom otpornosti od 24 % ( $146/118$ ). Za djelovanje požara od 5 minuta, svako povećanje debljine stijenke za obje legure rezultira minimalno dva puta većom otpornosti.



Slika 7. Otpornost i zagrijavanje elemenata  $L = 3,0$  m ovisno o vremenu izloženosti požaru

Pad otpornosti tijekom požara ovisi o koeficijentima smanjenja, tablica 2., koji se razlikuju za razmatrane legure, odnosno temperiranja. Tako je za leguru EN AW 6061–T4 pad mnogo veći nego za leguru EN AW 6061–T6, te se odstupanja u preostaloj otpornosti elementa između te dvije legure posebno primjećuju pri povećanoj debljini stijenke. Na primjer, za djelovanje požara od 2,5 minute otpornost elementa s najmanjom debljinom stijenke (4 mm), legura EN AW 6061–T4, smanjuje se na 71 % početne otpornosti (u trenutku  $t = 0$  min) dok je preostala otpornost legure EN AW 6061–T6 89 % početne (u trenutku  $t = 0$  min). Za djelovanje od 5 minuta i istu debljinu stijenke primjećuje se velik pad u otpornosti, pa je kod legure EN AW 6061–T4 to 7 %, a kod legure EN AW 6061–T6 16 % od pripadnih početnih otpornosti (u trenutku  $t = 0$ ). Za najveću promatranu debljinu stijenke, nakon 5 minuta požarnog djelovanja preostaje 21 % za EN AW 6061–T4, a legura EN AW 6061–T6 zadržava 51 % početne otpornosti.

Relativna promjena tlačne otpornosti elemenata pri požarnom djelovanju pokazuje bitne razlike za dvije razmatrane legure, odnosno temperiranja. Tako je iz tablice 3., i grafičkog prikaza na slici 7. za elemente duljine 3 metra vidljivo da se ukupno smanjenje otpornosti za 2,5 ili 5 minuta trajanja požara, u odnosu na početnu otpornost, značajno razlikuje za dva elementa istog presjeka, a različite legure. Može se zaključiti da izbor legure i temperiranja određuje početnu otpornost elementa kako u hladnom stanju, tako i u slučaju požara. Tako

su u trenutku  $t = 0$  min otpornosti legure EN AW 6061–T6 dva puta veće od legure EN AW 6061–T4, a u slučaju požara, zbog dvostruko manje duljine izvijanja u slučaju požara, otpornost je legure EN AW 6061–T6 četiri do šest puta veća od otpornosti legure EN AW 6061–T4. Ako se promatra jedna legura zasebno, veliku razliku u otpornosti čini promjena debljine stijenke za svaku skupinu uzoraka pojedine legure.

### 4.3. Zaključak parametarskih analiza

Ovom se parametarskom analizom prikazala razlika u ponašanju između dvije nazivno iste legure EN AW 6061 koje su dobivene iz istih primjesa, elemenata silicija i magnezija, ali su temperirane na kraju proizvodnje na različiti način. Obje legure, zbog različitog načina dozrijevanja, prirodnog (T4) i umjetnog (T6) imaju različito smanjenje granice popuštanja, odnosno otpornosti na izvijanje pri požarnom djelovanju. Legura koja prirodno dozrijeva pokazuje upola manju otpornost pri istoj temperaturi od legure koja umjetno dozrijeva za sve promatrane duljine tlačno opterećenog elementa.

Pad otpornosti tijekom djelovanja požara uvjetovan je koeficijentima smanjenja, tablica 3., koji se razlikuju za oba stanja temperiranja nazivno iste legure. Tako je za leguru EN AW 6061–T4, i isti poprečni presjek, pad puno veći u odnosu na leguru EN AW 6061–T6. Te se razlike u preostaloj otpornosti elementa između te dvije legure posebno primjećuju pri većoj debljini stijenke. Za isti profil aluminijskog elementa, s povećanjem njegove duljine (vitkosti) primjećuje se, unatoč većoj početnoj otpornosti legure EN AW 6061–T6, veće smanjenje otpornosti od smanjenja za leguru EN AW 6061–T4.

Odabir legure i temperiranja bitno određuje otpornost tlačno opterećenog elementa pri požaru. Općenito, legure serije 6xxx posjeduju osrednja mehanička svojstva, ali se vrlo lako oblikuju, dobro se zavaruju i posjeduju dobra antikorozijska svojstva. Ipak, razmatrane legure s različitim stanjima temperiranja EN AW 6061–T4 i –T6 pri djelovanju požara u vremenu od samo 5 minuta vrlo brzo gube otpornost na izvijanje i imaju visoko smanjenje čvrstoće. Napominje se da je ova parametarska analiza rađena samo za nezaštićene aluminijske elemente kako bi se dobio uvid u utjecaj odabira legure, odnosno temperiranja, kod proračuna otpornosti na izvijanje pri povišenim temperaturama. U praksi se požaru izloženi aluminijski profili obavezno štite od požara premazima ili izolacijskim materijalima za koje je potrebno provesti odgovarajući proračun otpornosti.

### 5. Zaključak

Aluminijske konstrukcije su izuzetno osjetljive na djelovanje povišenih – požarnih temperatura isključivo zbog vrlo brze degradacije mehaničkih svojstava konstrukcijskih aluminijskih legura pod utjecajem temperature. Zbog toga je poznavanje ponašanja materijala i materije oko dimenzioniranja konstrukcija iz aluminijskih legura u požarnim uvjetima ključno za svrhovito projektiranje. Kao što je pokazano na primjeru određivanja

nosivosti aluminijskog stupa u ovom radu, izuzetno je važno izabrati najpovoljniju leguru, odnosno temperiranje, i time maksimalno odgoditi gubitak nosivosti aluminijskih elemenata u požaru. Naravno, za dugotrajnije izlaganje povišenim temperaturama potrebno je što realnije procijeniti razvoj požara kako bi se mogla projektirati ekonomična i sigurna zaštita aluminijskih konstrukcija od požara.

## Zahvala

Prikazana istraživanja su djelomično podržana projektom KK.01.1.1.02.0027 – projekt sufinanciran iz Državnog proračuna Republike Hrvatske i od strane Europske unije iz Europskog fonda za regionalni razvoj unutar Operativnog programa "Konkurentnost i kohezija".

## LITERATURA

- [1] Skejić, D., Boko, I., Torić, N.: Aluminium as a material for modern structures, *Građevinar*, 67 (2015) 11, pp. 1075–1085, <https://doi.org/10.14256/JCE.1395.2015>
- [2] Boko, I., Skejić, D., Torić, N.: Aluminijske konstrukcije, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Udžbenik Sveučilišta u Splitu i Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, Split, 2017.
- [3] Mišović, M., Tadić, N., Lučić, D.: Deformacijske karakteristike aluminijskih legura, *Građevinar*, 68 (2016) 3, pp 179–189, <https://doi.org/10.14256/JCE.1457.2015>
- [4] Dokšanović, T., Džeba, I., Markulak, D.: Variability of structural aluminium alloys mechanical properties, *Structural safety*, 67 (2017), pp. 11–26.
- [5] Faggiano, B., De Matteis, G., Landolfo, R., Mazzolani, F.M., Behaviour of aluminium alloy structures under fire, *Journal of Civil Engineering and Management*, 10 (2004) 3, pp 183–190.
- [6] Maljaars, J., Twilt L., Fellingner, J.H.H., Snijder, H.H., Soetens F.: Aluminium structures exposed to fire conditions – an overview, *HERON*, 55 (2010) 2, pp. 85–115.
- [7] Skejić, D., Ćurković, I., Jelčić Rukavina, M.: Behaviour of aluminium structures in fire – A review, *ASFE'15: 4<sup>th</sup> International Conference on Applications of Structural Fire Engineering*, Dubrovnik, pp. 300–305., 2015.
- [8] 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. 1–15, <https://doi.org/10.3390/met7040126>
- [9] Torić, N., Boko, I., Uzelac, I., Harapin, A., Divić, V., Galić, M., Brnić, J., Čanađija, M., Turkalj, G., Lanc, D., Brčić, M., Burgess, I.: High-temperature properties of aluminum alloy EN6082AW T6, *Applications of Fire Engineering*, Manchester, pp. 31–35, 2017.
- [10] Torić, N., Uzelac Glavinčić, I., Burgess, I.: Development of a rheological model for creep strain evolution in steel and aluminium at high temperature, *Fire and materials*, 42 (2018), 8; pp. 879–888 <https://doi.org/10.1002/fam.2643>
- [11] HRN EN 1999–1–2:2015 Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija – Dio 1–2: Proračun konstrukcija na djelovanje požara (EN 1999–1–2:2007+AC:2009), 2015.
- [12] HRN EN 1999–1–2:2015/NA:2015 Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija – Dio 1–2: Proračun konstrukcija na djelovanje požara – Nacionalni dodatak, 2015.
- [13] Van Der Meulen O. R., Maljaars, J., Soetens F.: Cross-sectional classification of aluminium beams subjected to fire, *HERON*, 55 (2010) 3–4, pp. 285–301.
- [14] HRN EN 1991–1–2:2012/Ispr.1:2014 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1–2: Opća djelovanja – Djelovanja na konstrukcije izložene požaru (EN 1991–1–2:2002/AC:2013), 2014.
- [15] HRN EN 1999–1–1:2015 Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija – Dio 1–1: Opća pravila (EN 1999–1–1:2007+A1:2009+A2:2013), 2015.