



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,  
ARCHITECTURE AND GEODESY

## **KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT**

**Marko Goreta**

### **Utjecaj deformacija od puzanja na nosivost aluminijskih stupova pri nestacionarnom zagrijavanju**

**Split, veljača 2020.**

MATICE HRVATSKE 15  
21000 SPLIT - HRVATSKA /  
CROATIA  
[www.gradst.hr](http://www.gradst.hr)

T: +385 (0)21 303 333  
F: +385 (0)21 465 117  
E: [info@gradst.hr](mailto:info@gradst.hr)

IBAN:  
HR3724070001100579623  
OIB: 83615500218



**DOKTORSKI  
STUDIJ**  
VIŠOKE RAZINE  
KVALITETE

## **1. Uvod**

### **1.1 Općenito o požaru**

Požar je vrsta izvanrednog djelovanja na nosive konstrukcije koje uzrokuje veliku materijalnu štetu i u većini situacija ugrožava ljudske živote. Vrijeme i mjesto njegovog nastanka generalno se ne može predvidjeti već je, prema zahtjevima važeće građevinske regulative, potrebno osigurati dovoljnu otpornost konstrukcije da ne dođe do njenog kolapsa i da se omogući sigurna evakuacija ljudi u razumnom vremenskom intervalu. U 21. stoljeću propisi koji se odnose na vatrootpornost postaju sve rigorozniji zbog čestog izbijanja požara sa smrtnim posljedicama. U skladu s navedenim, javlja se potreba za detaljnijim istraživanjem i ponašanjem nosivih konstrukcija u požaru. Na ovu je temu za standardne građevinske materijale (čelik, beton, drvo, opeka) izrađen veliki broj numeričkih i eksperimentalnih analiza, ali za aluminijske konstrukcije je to relativno neistraženo područje. Budući da je aluminij relativno novi prirodni materijal kojega ima u veoma velikim količinama, smatra ga se materijalom budućnosti jer svojim materijalnim karakteristikama jako dobro konkurira čeliku, javlja se potreba za detaljnim istraživanjem na ovu temu, a u prilog tome ide i njegova velika osjetljivost na visoke temperature. Jedna od nepoznanica u slučaju djelovanja požara na aluminijske konstrukcije koja ima značajniji efekt na redukciju nosivosti je utjecaj deformacije od puzanja.

### **1.1 Karakteristike i primjena aluminija**

Najveći doprinos primjeni aluminija u svakodnevnoj građevinskoj praksi dao je Mazzolani [1-4]. Svojim iscrpnim studijama u kojima je detaljno obradio karakteristike aluminija te iznio glavne razlike u odnosu na građevinski čelik, postavio je osnovu za uvođenje i definiranje građevinskih normi za aluminij (EN 1999).

Čisti aluminij se gotovo nikada ne koristi jer ima relativno nisku čvrstoću, zbog toga se koriste njegove legure sa nekolicinom kemijskih elemenata (magnezij, silicij, mangan, bakar, cink). Takve legure aluminija imaju iznimno dobra mehanička svojstva (uključujući žilavost) pri niskim temperaturama. Usporedba fizikalnih svojstava aluminija s fizikalnim svojstvima klasičnoga građevinskoga čelika prikazana je u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba osnovnih fizikalnih svojstava aluminijskih legura u odnosu na fizikalna svojstva čelika [5]

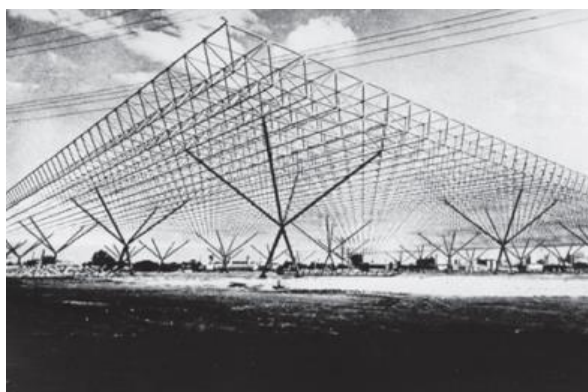
Fizikalna svojstva / Metal	Aluminij / Al legure	Čelik
talište	660 °C	1425 – 1540 °C
gustoća pri 20°C	2700 kg/m <sup>3</sup>	7850 kg/m <sup>3</sup>
toplinsko izduljenje	23 · 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	12 · 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
specifična toplina	~ 920 J/kg°C	~ 440 J/kg°C
toplinska provodljivost	~ 240 W/m°C	~ 54 W/m°C
modul elastičnosti	70 000 N/mm <sup>2</sup>	210 000 N/mm <sup>2</sup>
modul posmika	27 000 N/mm <sup>2</sup>	81 000 N/mm <sup>2</sup>
poissonov koeficijent	0,3	0,3

Glavna pozitivna svojstva aluminija tj. osnovne prednosti aluminija u odnosu na čelik su:

- otpornost na koroziju – značajna ušteda u antikorozivnom materijalu i održavanju
- mala težina – 2.9 puta lakši od čelika što uvelike olakšava izvođenje konstrukcije
- jednostavno oblikovanje i ekstruzija elemenata – ušteda materijala zbog bolje iskoristivosti elemenata, a samim time i cijele konstrukcije.

Od ostalih važnih svojstava bitno je napomenuti kako aluminij dobro reflektira svjetlost i toplinu, nije feromagnetičan, nije kancerogen te praktički nema nikakvih negativnih utjecaja na okoliš.

S obzirom na navedene prednosti, mnogi poznati objekti u svijetu su napravljeni dijelom ili u potpunosti od aluminija. Najbolji primjer je Interamerički izložbeni centar u Sao Paulu u Brazilu izgrađen 1969.g. na površini od približno 67.600 m<sup>2</sup> (Fotografija 1.). Zanimljivost navedenog primjera je njegova konstrukcija koja ima raspodijeljenu masu od 16 kg/m<sup>2</sup> i što je vrijeme montaže bilo izuzetno kratko (27 sati). U navedenom objektu korištena je legura aluminija 6063 i 6351 serije T6.



Fotografija 1. Krovna konstrukcija za Interamerički izložbeni centar, Sao Paolo, Brazil [5]

Još neki primjeri značajnih aluminijskih konstrukcija su:

- Aluminijski dalekovodni tornjevi u Napulju [5]
- Autocestovni most Arvida u Quebecu, Kanada [5]
- Pješački most u Francuskoj [6]
- Planetarium u Shangaju (legura 6061-T6) [7].

Osim navedenih prednosti, aluminij ima i značajne nedostatke, a to su visoka cijena (oko 7 puta skuplji od čelika) i smanjena otpornost na djelovanje visokih temperatura. Temperatura tališta aluminija je otprilike 660°C, dok značajan pad nosivosti nastaje već na temperaturama iznad 150°C.

## 2. Pregled područja istraživanja

S obzirom na znatan tehnološki napredak i intenzivno uvođenje aluminija u građevinsku svakodnevnicu proteklih nekoliko desetljeća, javlja se potreba za detaljnim istraživanjima povezanim s ponašanjem legura aluminija izloženih različitim tipovima i načinima opterećenja. Požar je relevantna istraživačka tema i stoga je bitno, zbog njegove osjetljivosti, istražiti ponašanje aluminijskih konstrukcija u požaru kako bi se mogle odrediti odgovarajuće mjere protupožarne zaštite. Zbog relativno niske temperature tališta aluminija (oko 660°C), deformacije od puzanja javljaju se na relativno niskim temperaturama nego kod čelika (približno 400°C). Zbog navedenog potrebno je detaljnije istražiti razvoj potencijalnih deformacija od puzanja koje se mogu javiti u aluminijskim konstrukcijama i dodatno smanjiti otpornost konstrukcije u slučaju požara.

Sredinom dvadesetog stoljeća razvijeni su prvi modeli puzanja pri visokim temperaturama. U navedenom području najznačajniji doprinos dali su Dorn [9] i Harmathy [10]. Dorn je u svom istraživanju prikazao neke smjernice za usporedbu analitičkih studija s eksperimentalnim rezultatima puzanja pri visokim temperaturama, dok je Harmathy prvi započeo istraživati razvoj puzanja uslijed nestacionarnog zagrijavanja (za čelik). Jedan od prvih istraživača koji se u dvadesetom stoljeću počeo baviti utjecajem puzanja na aluminijske stupove izložene uzdužnoj tlačnoj sili bio je Chapman et al. [11].

Najveći doprinos povezan s djelovanjem požara na aluminijske elemente i konstrukcije je dao Maljaars [12-17] u vremenskom periodu od 2005. do 2010. godine. U prvim radovima [12-13] definirao je osnovna načela za istraživanje utjecaja visokih temperatura na različite tipove aluminijskih konstrukcija i elemenata te njihovu manifestaciju u vidu nosivosti aluminijskih elemenata. Zatim je istraživao [15-16] ponašanje vitkih tankostijenih aluminijskih elemenata u požaru te interakciju istovremenog djelovanja puzanja i izvijanja. Maljaars je u svom zadnjem spomenutom radu [17] koristio prikazani Dornov i Harmathyev model kao dobru podlogu za definiranje deformacija puzanja u slučaju nestacionarnog zagrijavanja.

Detaljnu studiju povezanu s ponašanjem aluminijskih epruveta iz 5xxx i 6xxx serije objavili su Summers et al. [18]. U radu je prikazana razlika u mehaničkim svojstvima aluminijskih epruveta izloženih ekstremnim temperaturama u dvama različitim stanjima. Dio uzoraka je ispitan pri ambijentalnoj (normalnoj) temperaturi neposredno nakon zagrijavanja do 500°C brzinama od 5-250°C/min, a dio je ispitan u fazi zagrijavanja. U radu je prikazano da visoke temperature (iznad 400°C) značajno mijenjaju mikrostrukturu materijala i njegovu kristalnu rešetku te imaju utjecaj na nosivost u vidu smanjenja modula elastičnosti te povećanja deformacije od puzanja prilikom ponovnog zagrijavanja i opterećenja. Yu Liu et al. [19] analizirao je ponašanje legure 6082 T6 na temperaturama iznad 400°C. U svom radu iznosi zaključke da modul elastičnosti drastično opada tek za epruvete prethodno izložene temperaturi iznad 400°C. Torić et al. [8] razvio je analitički model puzanja za leguru 6082 T6 i usporedio ga sa rezultatima stacionarnih testova te dobio relativno dobru verifikaciju rezultata. Jedan od zaključaka navedene studije je da se puzanje aluminijskih epruveta javlja već pri temperaturi od 150°C dok je kritični interval za razvoj značajnijih deformacija od puzanja između 200°C i 300°C.

Nadalje, istraživanjem utjecaja puzanja aluminijskih epruveta u požaru bavili su se i istraživači Kandare et al. [20] i Thomopoulos [21]. Kandare je u svom radu predstavio model koji predviđa deformaciju prvih dviju faza puzanja uslijed nestacionarnog režima zagrijavanja na aluminijskoj slitini iz serije 5xxx. Svoje istraživanje je ograničio samo na ispitivanje aluminijskih ploča i nije uspio istu zakonitost primijeniti na kompleksnije elemente i građevine. Thomopoulos je proveo sličnu istraživačku studiju primjenjenu na aluminijskim grednim elementima izrađenim od legure EN AW 6061-T6. Thomopoulos je u studiji zaključio da deformacija od puzanja ima utjecaj na aluminijsku gredu izloženu temperaturi od 200°C s vrijednošću od čak 29%. Također, numeričku i eksperimentalnu analizu aluminijskih grednih elemenata izloženih požaru proveli su Yong-Qian Zheng i Zheng Zhang [22]. Napisali su studiju o načinu zagrijavanja aluminijskih I stupova sa protupožarnom i bez protupožarne zaštite te prikazali kako se ponaša zagrijani element. Na temelju navedenog istraživanja, definirali su praktične formule za proračun razdiobe temperature zagrijavanja i njihov utjecaj na nosivost aluminijskih epruveta iz serije 5xxx i 6xxx koje su verificirali modelom iz ABAQUS-a.

Iz prikazanog pregleda dosadašnjih istraživanja vidljivo je da je istraživanje o temi ponašanja aluminijskih stupova u požaru i utjecaja deformacije od puzanja na nosivost istih relativno neistraženo područje. Iznimke od navedenog su studije ponašanja aluminijskih stupova izloženih požaru na legurama koje su napisali Mei Liu et al. [23] i Shouchao Jiang et al. [24]. Navedene studije uglavnom su se fokusirale na utjecaj visokih temperatura na izvijanje stupova različitih poprečnih presjeka i vitkosti. Navedene studije istraživale su vremensku otpornost i oblik

otkazivanja stupova te nije promatran utjecaj puzanja. Navedeno ukazuje na potrebu za provedbom detaljnije analize utjecaja puzanja. Podloga za provedbu planiranog istraživanja koje se odnosi na utjecaj deformacija puzanja na nosivost stupova pri nestacionarnom zagrijavanju postavljena je u istraživanju kojeg je proveo Torić et al., a vezana je za utjecaj puzanja čeličnih [25] i aluminijskih [8] stupova (legura 6082 T6) pri konstantnoj temperaturi. U spomenutom istraživanju napisana je detaljna studija utjecaja deformacija od puzanja na 34 čelična i aluminijska stupa za različite temperature i razine opterećenja u okviru stacionarnih testova.

Ispitivanja uz nestacionarno zagrijavanje nosivih elemenata nisu previše zastupljena zbog njihove složenosti, dok u literaturi postoji određeni broj nestacionarnih ispitivanja provedenih na epruvetama. Jryi Outinen et al. [26-27] je 1996. među prvima provodio ispitivanja uz nestacionarno zagrijavanje na čeličnim (kvalitete S355 i S420) epruvetama.

### **3. Planirana tema istraživanja**

#### **3.1 Vrste ispitivanja**

Kako bismo uspješno odredili nosivost elemenata konstrukcije prilikom djelovanja požara, nužno je provesti eksperimentalnu analizu uz provođenje zagrijavanja. Vrste eksperimenata koji se mogu izvoditi su:

- testovi uz konstantnu temperaturu (stacionarni test)
- testovi uz konstantan prirast temperature (nestacionarni test).

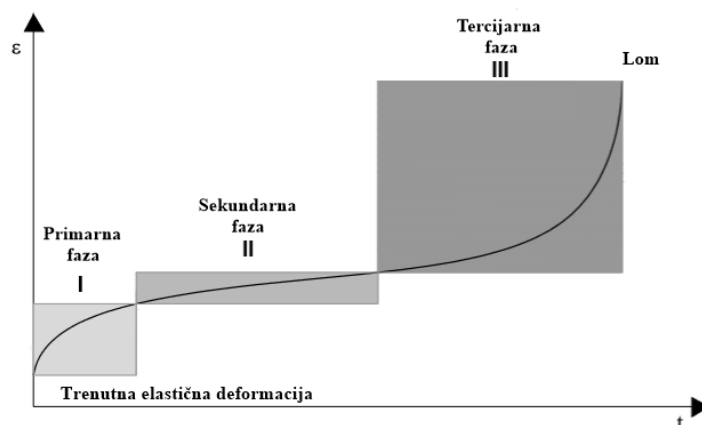
Stacionarni testovi koriste se kako bi definirali ponašanje epruvete/elementa izloženog konstantnoj temperaturi uz polagani prirast opterećenja do sloma konstrukcije.

Nestacionarni testovi (povećanje temperature do otkazivanja epruvete/elementa uz konstantno opterećenje) realnije simuliraju zagrijavanje konstrukcije prilikom razvoja požara. Složenost ovakvih testova i njihova relativno slaba zastupljenost u znanstvenoj zajednici se temelji na značajnom broju parametara koje treba pratiti prilikom izvođenja eksperimenta. Iznos konstantnog opterećenja pri izvedbi nestacionarnih testova je generalno manji od slomnog opterećenja pri stacionarnim testovima.

#### **3.2 Puzanje metala pri visokim temperaturama**

Puzanje metala je vremenski ovisna neelastična deformacija koja nastaje uslijed konstantnog opterećenja na povišenoj temperaturi u određenom vremenu  $t$ . Na puzanje metala također znatno utječu materijalne karakteristike (temperatura tališta) te kristalna struktura materijala, odnosno kemijski sastav legure. Kod većine metala, značajno puzanje se javlja na oko 30% temperature tališta metala. Razvoj deformacija od puzanja u slučaju konstantne temperature sastoji se od tri faze (Crtež 1):

- primarna faza – glavno puzanje koje se sastoji od elastičnog i plastičnog dijela (uključuje početnu deformaciju  $\varepsilon_0$  u vremenu  $t_0$ )
- sekundarna faza – faza konstantnog prirasta puzanja
- tercijarna faza – naglo povećanje puzanja koje dovodi do loma materijala.



Crtež 1. Faze puzanja [13]

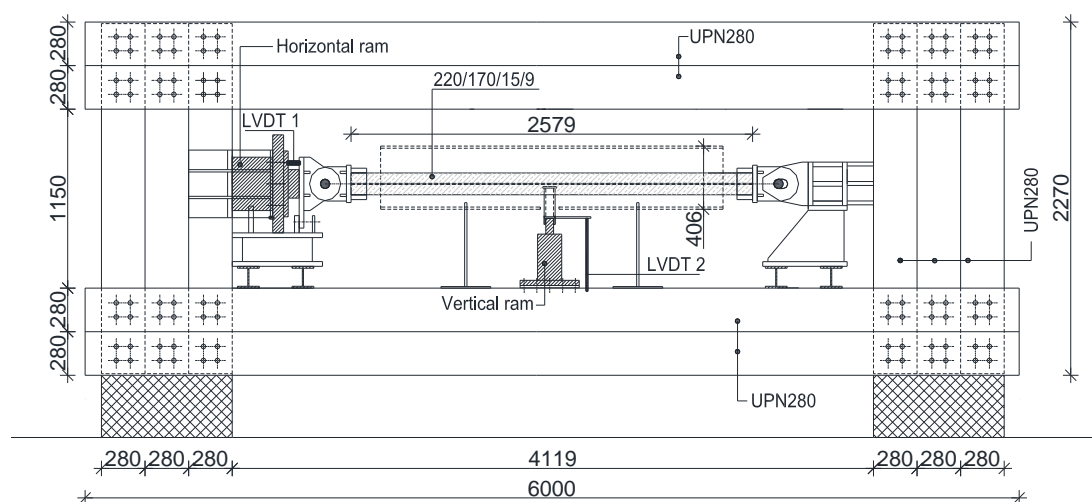
Harmathy je na temelju svojih studija [10, 28] predložio dva modela u vezi s deformacijom od puzanja na visokim temperaturama pri nestacionarnom razvoju temperature, a to su modeli koji uzimaju u obzir razvoj deformacija uz primjenu vremenskog očvršćivanja i deformacijskog očvršćivanja. U prvom modelu iz 1967. [28] Harmathy je detaljno obradio pravilo vremenskog očvršćivanja te je pokazao kako je u situacijama u kojima se naprezanje zanemarivo mijenja u vremenu, deformacija od puzanja isključivo funkcija vremena i razine naprezanja. Drugi model iz 1976. [10] pokazuje kako ukupna deformacija od puzanja ovisi o razini naprezanja te o deformaciji od puzanja iz prethodnog vremenskog intervala. Oba navedena modela obuhvaćaju primarnu i sekundarnu fazu puzanja. Povezano s ovom temom, Morrovat [29] je u svojoj disertaciji istražio kako deformacijsko očvršćivanje iščezava povećanjem temperature, tj. kako se utjecaj mikrostrukturnog deformacijskog očvršćivanja smanjuje značajnim povećanjem temperature.

Navedeni primjeri modela puzanja iz literature su testirani na čeliku i njegove zakonitosti generalno ne vrijede za aluminij, stoga je potrebno napraviti studiju o ovoj temi s ciljem usporedbe ponašanja različitih materijala pri visokim temperaturama. Jedini način da se definira razvoj deformacija od puzanja je primjena različitih eksperimentalnih metoda. Budući da je razvoj puzanja relativno složen, potrebno je napraviti dovoljno adekvatnih testova kako bi se osigurali valjani rezultati. To nije uvijek moguće, zbog toga se često koriste metode koje se baziraju na predviđanju rezultata na temelju različitog odnosa naprezanja, temperature i vremena. Jedan od modela preložio je Ghatak [30] koristeći umjetne neuralne mreže kako bi simulirao krivulje puzanja iz određenog broja testova puzanja.

### 3.3 Laboratorij i oprema za mjerenje

Svi testovi planiraju se provoditi u Laboratoriju za konstrukcije (za potrebe pripadajućeg institucijskog projekta navedenog laboratorija) na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, u laboratorijskoj jedinici za požarno ispitivanje nosivosti građevinskih elemenata (Crtež 2.).

Okvir za testiranje predstavlja čelična konstrukcija visoka 2270 mm i duga 6000 mm smještena na betonskom postolju (Crtež 2.). Okvir je izrađen od masivnih UPN280 profila koji su međusobno zavareni i spojeni vijcima M27 kako bi osigurali dovoljnu krutost konstrukcije i spriječili moguće horizontalne pomake okvira koji bi mogli utjecati na rezultate testova.



Crtež 2. Okvir za testiranje [31]

U sredinu okvira horizontalno se postavlja stup zglobno pridržan na obje strane. Desna strana je nepomična i onemogućen je horizontalni pomak stupa, dok se na lijevoj strani nalazi hidraulička preša kojom unosimo horizontalnu silu u sustav i na taj način simuliramo klizni ležaj, tj. omogućeni su pomaci kraja stupa u uzdužnom smjeru. Za unos vertikalne sile koristiti će se vertikalna hidraulična preša. Stupovi će biti izloženi savijanju zbog simuliranja utjecaja geometrijskih imperfekcija i neutralizacije vlastite težine prilikom testa, tj. kako bi omogućili otkazivanje stupa prema gore. Spomenuti ležajevi su izvedeni preko čeličnih uložaka odgovarajućih dimenzija (tolerancije  $\pm 1$  mm) spojenih krutim čeličnim bolcenima promjera  $\text{Ø}60$ . Kako bi reducirali trenje prilikom ispitivanja, bolceni se namjeravaju izbrusiti oko rupe i na taj dio aplicirati keramičku mast koja omogućava elegantno klizanje na izloženom dijelu bolcena. Navedeni bolceni su izrađeni od čelika kvalitete S355.

Oprema za mjerenje pomaka bit će montirana na horizontalnu i vertikalnu prešu (LVDT 1 i 2), dok ćemo za kontrolu zagrijavanja koristiti termoparove pričvršćene za profil na pojasnicama i na hrptu



u pet presjeka duž stupa. Također, na čeličnu cijev će biti zavaren kontrolni termopar kako bi efektno regulirali temperaturu prilikom ispitivanja.

Za zagrijavanje će se koristiti indukcijski ProHeat 35 Miller uređaj (Fotografija 2.) sa sistemom tekućeg hlađenja kabela. Ovaj relativno novi način zagrijavanja izvodi se tako da oko čelične cijevi omotamo plave indukcijske kablove kojima generiramo magnetno polje oko cijevi. Magnetno polje inducira ubrzano zagrijavanje feromagnetičnih materijala (čelika) u svom dometu bazirano na podešenoj snazi stroja (do 35 kW).



*Fotografija 2. Stroj za zagrijavanje s opremom*

Budući da aluminij nije feromagnetičan materijal, ne može se zagrijavati direktno indukcijski pa će se uzorak zagrijavati toplinskim tokom uslijed radijacije čelične cijevi koja u ovom slučaju služi kao peć koja emitira toplinu. S obzirom na to da je peć kružnog oblika, ona predstavlja jednoliki izvor zagrijavanja poprečnog presjeka stupa. Tijekom testa, najveća temperatura se može postići u sredini stupa, dok prema krajevima postupno opada.

#### **4. Smjernice za istraživanje i temu doktorata**

Uzevši u obzir navedeni pregled literature i trenutno stanje istraživačkog područja, istraživanje u okviru disertacije bazirat će se na ispitivanju nosivosti aluminijskih stupova izloženih visokim temperaturama uz primjenu nestacionarnog zagrijavanja. U okviru doktorske disertacije planiran je razvoj novog modela puzanja koji će se verificirati planiranim eksperimentima. U planu je detaljna eksperimentalna analiza na najmanje 10 aluminijskih stupova koji će biti izloženi nestacionarnom zagrijavanju kako bi se verificirao spomenuti model puzanja i istražio utjecaj deformacija od puzanja na nosivost stupova. Istraživanje će se bazirati na aluminijskim stupovima kao najbitnijim, a ujedno i najosjetljivijim djelovima konstrukcije, jer u realnom požaru upravo popuštanje stupova najčešće dovodi do neizbježnog kolapsa konstrukcije. Stupovi će biti zagrijavani konstantnim prirastom temperature, što simulira realnu situaciju prilikom izbijanja požara, tj. tada će biti dominantna samo

promjena temperature koja će ovisno o intenzitetu, izloženosti i trajanju požara rezultirati redukcijom nosivosti. Konstantni prirast temperature u planiranim eksperimentima očekuje se ispod  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , što predstavlja realni scenarij zagrijavanja protupožarno zaštićenog aluminijskog stupa u slučaju požara. Do sada napravljeni preliminarni testovi [31] poslužiti će kao korisna podloga za nastavak istraživanja teme utjecaja deformacije od puzanja na nosivost aluminijskih stupova izloženih nestacionarnom zagrijavanju.

## Zahvala

Provođenje eksperimenata planira se na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu u okviru Laboratorija za konstrukcije. Testovi predstavljaju nastavak istraživanja prikazanih u okviru istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost pod naslovom Utjecaj deformacija od puzanja na nosivost čeličnih i aluminijskih stupova pri djelovanju požara (UIP-2014-09-5711).

## Literatura

- [1] F. M. Mazzolani, "Design Criteria for Aluminium Alloy Structures.", In Proceedings: Eurocodes: Background and applications, „dissemination of information for training“ workshop, European Commission DF Enterprise and Industry, Joint Research Centre, Brussels, Belgium, February, 2008
- [2] F. M. Mazzolani, "Static design of aluminium structures," *Struct. Eng. Int. J. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 301–304, 2006
- [3] A. Formisano, G. De Matteis, and F. M. Mazzolani, "Experimental and numerical researches on aluminium alloy systems for structural applications in civil engineering fields," *Key Eng. Mater.*, vol. 710, September, pp. 256–261, 2016
- [4] F. M. Mazzolani, *Improvement of Buildings Structural Quality by New Technologies*. 2005.
- [5] D. Skejić, I. Boko, and N. Torić, "Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije," *Gradjevinar*, vol. 67, no. 11, pp. 1075–1085, 2015
- [6] T. Dokšanović, I. Džeba, and D. Markulak, "Applications of aluminium alloys in civil engineering," *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, vol. 24, no. 5, 2017
- [7] X. Guo, L. Tao, S. Zhu, and S. Zong, "Experimental Investigation of Mechanical Properties of Aluminum Alloy at High and Low Temperatures," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 32, no. 2, 2020
- [8] N. Torić, J. Brnić, I. Boko, M. Brčić, I. W. Burgess, and I. Uzelac, "Experimental analysis of the behaviour of aluminium alloy EN 6082AW T6 at high temperature," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 4, 2017
- [9] J. E. Dorn, "Some fundamental experiments on high temperature creep," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 3, no. 2, 1955

- [10] T. Z. Harmathy, "Creep Deflection of Metal Beams in Transient Heating Processes, With Particular Reference To Fire.," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 219–228, 1976
- [11] J. C. Chapman, B. Erickson, and N. J. Hoff, "A theoretical and experimental investigation of creep buckling," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 1, no. 2–3, pp. 145–174, 1960
- [12] J. Maljaars, "Literature Study on Aluminium Structures Exposed to Fire," 2005.
- [13] J. Maljaars, J. Fellingner, and F. Soetens, "Fire exposed aluminium structures," *Heron*, vol. 50, no. 4, pp. 261–278, 2005.
- [14] J. Maljaars, F. Soetens, and L. Katgerman, "Constitutive model for aluminum alloys exposed to fire conditions," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 39 A, no. 4, pp. 778–789, 2008
- [15] J. Maljaars, F. Soetens, and H. H. Snijder, "Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 2: Finite element models," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 11, pp. 1418–1428, 2009
- [16] J. Maljaars, F. Soetens, and H. H. Snijder, "Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 1: Tests," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 11, pp. 1404–1417, 2009
- [17] J. Maljaars, L. Twilt, J. H. H. Fellingner, H. H. Snijder, and F. Soetens, "Aluminium structures exposed to fire conditions - An overview," *Heron*, vol. 55, no. 2, pp. 85–122, 2010.
- [18] P. T. Summers *et al.*, "Overview of aluminum alloy mechanical properties during and after fires," *Fire Sci. Rev.*, vol. 4, no. 1, 2015
- [19] Y. Liu, H. Liu, and Z. Chen, "Post-fire mechanical properties of aluminum alloy 6082-T6," *Constr. Build. Mater.*, vol. 196, pp. 256–266, 2019
- [20] E. Kandare, S. Feih, A. Kootsookos, Z. Mathys, B. Y. Lattimer, and A. P. Mouritz, "Creep-based life prediction modelling of aluminium in fire," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 4–5, pp. 1185–1193, 2010
- [21] Thomopoulos A. Kimon and P. G. Foteini, "Creep in aluminium structures," pp. 435–442, 1999.
- [22] Z. Yong-Qian and Z. Zheng, "The fire performance and fire-resistance design of aluminium alloy I-beams," *FIRE Mater.*, 2014
- [23] S. Jiang, Z. Xiong, X. Guo, and Z. He, "Buckling behaviour of aluminium alloy columns under fire conditions," *Thin-Walled Struct.*, vol. 124, pp. 523–537
- [24] M. Liu, Y. Chang, P. Wang, and L. Zhang, "Buckling behaviors of thin-walled aluminum alloy column with irregular-shaped cross section under axial compression in a fire," *Thin-Walled Struct.*, vol. 98, pp. 230–243, 2016
- [25] N. Torić, I. Boko, V. Divić, and I. W. Burgess, "Behaviour of steel grade S275JR columns under the influence of high-temperature creep," *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 11, 2018

- [26] J. Outinen, J. Kesti, and P. Mäkeläinen, "Fire Design Model for Structural Steel S355 Based Upon Transient State Tensile Test Results," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 42, no. 3, pp. 161–169, 1997
- [27] P. Mäkeläinen, J. Outinen, and J. Kesti, "Fire design model for structural steel S420M based upon transient-state tensile test results," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 48, no. 1, pp. 47–57, 1998
- [28] T. Z. Harmathy, "A Comprehensive Creep Model," *J. Basic. Eng. Trans.*, 89, 469-502.
- [29] M. A. Morovat, M. D. Engelhardt, T. A. Helwig, and E. M. Taleff, "Creep Buckling Behavior of Steel Columns Subjected to Fire," *Fac. Grad. Sch. Univ. Texas Austin*, p. 555 pp, 2014
- [30] A. Ghatak and P. S. Robi, "Prediction of creep curve of HP40Nb steel using artificial neural network," *Neural Comput. Appl.*, vol. 30, no. 9, pp. 2953–2964, 2018
- [31] M. Goreta, N. Torić, V. Divić, and I. Boko, "Testing the influence of creep on fire-exposed aluminium columns", 9th International Congress of Croatian Society of Mechanics, Split, Croatia, pp. 1–10, September, 2018.