

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.2>

Reološki model aluminijских legura pri visokim temperaturama

Rheological model of aluminium alloys at high temperatures

Domagoj Bendić¹, Neno Torić¹, Ivica Boko¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, dbendic@gradst.hr, ntoric@gradst.hr, iboko@gradst.hr

Sažetak

U radu je sadržan pregled istraživanja aluminijских legura i njihovih primjena u vidu nosivih dijelova konstrukcije. Naglašene su prednosti i mogući nedostaci korištenja elemenata izrađenih od aluminijских legura naspram čelika kao primarnog metala u građevinskoj industriji, s ciljem njegove učestalije upotrebe. Poseban fokus je na radovima o eksperimentalnom ispitivanju mehaničkih svojstava aluminijских legura pri visokim temperaturama odnosno potencijalnoj procjeni njihovih reduciranih svojstava, osobito o vremenski ovisnim deformacijama - puzanju. Sagledani su dostupni reološki modeli i mogućnosti adekvatne prilagodbe i primjene na aluminijске legure. U planu je razviti poopćen model puzanja prikladan svim aluminijским legurama za konstrukcijsku namjenu odnosno reološki model s ciljem predikcije mehaničkih svojstava nakon požara.

Ključne riječi: aluminij, aluminijске legure, požar, mehanička svojstva, konstitutivno ponašanje, puzanje, reološki model

Abstract

The paper presents an overview of research on aluminium alloys and their applications as load-bearing structural components. It highlights the advantages and potential deficiencies of using elements made of aluminium alloys compared to steel, which remains the primary metal material in the construction industry, with the aim of encouraging more widespread use of aluminium. Particular attention is given to studies involving experimental testing of the mechanical properties of aluminium alloys at elevated temperatures, with a focus on the assessment of their reduced properties, especially time-dependent deformations - creep. Available rheological models are reviewed, including possibilities for their adequate adaptation and application to aluminium alloys. The intention is to develop a generalised creep model applicable to all aluminium alloys for structural purposes, also rheological model aimed at predicting mechanical properties following fire exposure.

Keywords: aluminium, aluminium alloys, fire, mechanical properties, constitutive behaviour, creep, rheological model

1. Uvod

Aluminij, iako treći najzastupljeniji element u Zemljinoj kori, relativno je nov materijal čija je upotreba u nosivim konstrukcijama omogućena razvojem odgovarajućih legura. Danas je, uz čelik, jedan od najvažnijih metala u građevinskoj industriji. Neke od prednosti su niska gustoća (oko trećine gustoće čelika), otpornost na koroziju bez dodatnih zaštita, nemagnetičnost te zadržavanje dobre duktilnosti, za razliku od čelika koji je sklon krutom lomu, pri niskim temperaturama. Visoko je reciklabilan, što ga čini održivim materijalom – procjene govore da će 70-98% današnjih aluminijских konstrukcija biti reciklirano [1]. Legure prikladne za konstruktivne svrhe, iz serije 6xxx, su EN AW-6082, 6061, 6005A, 6106, 6063 i 6060 [2]. Međutim, aluminij ima i značajnih nedostataka. Niže talište i brža degradacija mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama čine ga manje otpornim na požar u odnosu na čelik. Degradacije su primjetne već iznad 100°C, a iznad 200°C mogu postati značajne. Zbog visokog koeficijenta toplinske vodljivosti, toplina se brže širi kroz aluminijске elemente, što je otegotna okolnost u otpornosti konstrukcije na požar. Nadalje, ponašanje aluminijских legura zbog mikrostrukture oblika kristalne rešetke čije praznine omogućavaju difuzijsko gibanje atoma karakteriziraju vremenski ovisne deformacije kod dugotrajnog opterećenja materijala – puzanje, posebno pri izlaganju povišenim temperaturama.

2. Pregled istraživanja

2.1. Eksperimentalno određivanje svojstava aluminijских legura

Brojne studije usmjerene su na analizu materijalnih karakteristika i ponašanje aluminijских legura pri sobnim temperaturama. Međutim, svojstva i reducirana nosivost nakon izlaganja povišenim temperaturama još su uvijek nedovoljno istraženi.

Eksperimentalna ispitivanja s ciljem određivanja odnosa naprezanja i deformacija aluminijских legura pri povišenim temperaturama proveli su Maljaars et al. [3], pri čemu su posebnu pažnju posvetili utjecaju puzanja. Oblik krivulje odnosa naprezanja i deformacija ovisi o vrsti aluminijске legure, dodatno, ista legura nema jednak oblik krivulje naprezanje-deformacija pri sobnoj temperaturi u odnosu na onu pri povišenim temperaturama [4, 5]. Torić et al. [6] proveli su dva različita tipa ispitivanja kako bi odredili deformacije uzrokovane naprezanjem te one povezane s puzanjem – stacionarni test puzanja. Predlažu analitički model prikladan za interpretaciju rezultata ispitivanja deformacija, uključujući sve tri faze puzanja. Na legurama 6063-T5 i 6061-T6, Su et al. [7], vrše stacionarne i nestacionarne testove pri temperaturama do 600°C. Liu et al. [8] provode detaljnu analizu stacionarnim vlačnim ispitivanjima uzoraka legure 6082-T6 zagrijanih od 100°C do 550°C, nakon čega su pred testove podvrgnuti prirodnom hlađenju ili hlađenju vodom. Na aluminijскоj leguri 6063-T5 s ispitivanjima do 550°C, Sun et al. [9], potvrdili su izražen utjecaj povišenih temperatura na mehanička svojstva, osobito iznad 200°C, uz prijedlog niza modela za procjenu postpožarnih svojstava navedene aluminijске legure. Megalingam et al. [10] provode ispitivanja aluminijске legure 7075 pri stalnoj temperaturi od 250°C i konstantnom visokom razinom naprezanja kako bi analizirali njeno ponašanje pri puzanju u uvjetima dugotrajnog toplinskog opterećenja.

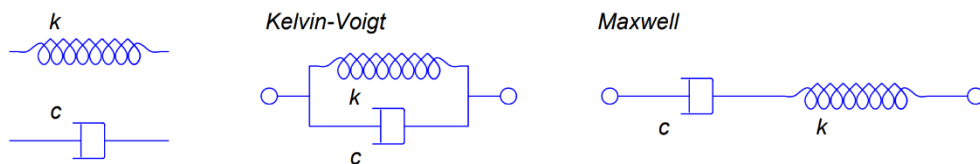
2.2. Procjena svojstava aluminijskih legura

Suzuki et al. [11] proveli su ispitivanja stupova i greda od aluminijskih legura pri požarnom opterećenju s ciljem određivanja odnosa naprezanja i kritične temperature. Temeljem dobivenih rezultata razvili su numeričke jednadžbe za predviđanje porasta temperature i jednadžbu procjene kritične temperature elemenata izloženih zagrijavanju. Ne uvažavajući učinak početnih imperfekcija i puzanja, Fogle et al. [12], razvijaju jednostavan analitički model za predikciju otkazivanja u požaru. Maljaars et al. [13] naglašavaju ograničenja konstitutivnog modela Harmathyja [14], osobito u kontekstu aluminijskih legura serije 6xxx koje pokazuju rani razvoj terciarne faze puzanja. Razvijaju numerički model baziran na metodi konačnih elemenata zbog verifikacije konstitutivnog modela aluminijskih legura u požaru. Predlažu proširenje Dornovog odnosno Harmathyjevog modela odnosa naprezanja i deformacija u nestacionarnom režimu za aluminijske legure izložene požaru [15]. Maljaarsovo proširenje modela, prilagodbom parametara specifičnih legurama, koristi i Soyal [16], koji ga validira kroz nestacionarne testove s rastućom temperaturom i konstantnim ili varijabilnim opterećenjem. Nadogradnjom Maaljarsovog modela dodatnim parametrima, Kandare et al. [17], omogućili su procjenu otkazivanja tlačno opterećenih aluminijskih elemenata u požarnim uvjetima. Torić et al. [18] istražuju fenomen deformacija puzanja aluminija izloženog visokim temperaturama. Ključnim mehanizmom puzanja pri povišenim temperaturama smatraju dislokaciju uspona prema susjednoj ravnini klizanja te razvijaju reološki model koji obuhvaća sve tri faze puzanja. Model je uz radom definirana ograničenja primjenjiv na sve metale podložne puzanju na visokim temperaturama, a radom je kalibriran za čelik klase S275 odnosno aluminijsku leguru 6082-T6. Zheng i Zhang [19] istražuju ponašanje aluminijskih greda – legure 5083-H112 i 6060-T66, sa i bez zaštite, pri sobnim i povišenim temperaturama. Na temelju dobivenih rezultata i izrađenih modela ukazuju na konzervativnost pristupa kritičnoj temperaturi prema Eurokodu 9 te predlažu pojednostavljene formule za prirast temperature i proračun kritične temperature ovisno o vrsti legure. Pod različitim toplinskim i mehaničkim uvjetima, Li et al. [20] razvili su skup konstitutivnih modela za leguru 7050 definiranjem odnosa deformacije puzanja i očvršćivanja starenjem. Ovi modeli omogućuju pouzdano predviđanje svojstava materijala neovisno o početnim stanjima i povijesti opterećenja. Ispitivanjima legure 7075-T6, Sun et al. [21], odredili su koeficijente redukcije materijalnih svojstava u temperaturnom rasponu od 20°C do 550°C odnosno predložen je niz modela za procjenu krutosti i čvrstoće aluminijskih legura visoke čvrstoće tijekom i nakon požara. Kako bi obuhvatili cijeli spektar ponašanja aluminijskih legura pri povišenim temperaturama, autori su prilagodili modificirani dvostupanjski Ramberg-Osgood model prethodno predložen od Yun et al. [22] temeljen na opsežnoj bazi podataka s više od 700 krivulja naprezanje-deformacija pri sobnoj temperaturi. Spigarelli i Sandström [23] razvijaju model za procjenu razine puzanja čistog aluminija, a za kojeg je potrebno eksperimentalno utvrditi kemijski sastav, naprezanje i temperaturu.

3. Reološki model aluminija

Postojeći modeli opisani u prethodnom poglavlju, modeli predviđanja pojedinih materijalnih karakteristika, velika su karika u definiranju reološkog modela aluminija. Prvi reološki model razvijen je sedamdesetih godina 20. stoljeća, opisan Kelvinovim modelom sastavljenim od

opruge i prigušivača s pripadajućim konstantama, s ciljem procjene nelinearnih deformacija i otkazivanja nosivosti u betonu [24]. Za prezentiranje viskoelastičnih odgovora u čeliku, Chindam et al. [25], primjenjuju Kelvin-Voigtove i Maxwellove modele – paralelnu odnosno serijsku vezu opruge i prigušivača (**Slika 1.**). Analizirajući utjecaj topline na materijal tijekom cikličkih ispitivanja, kao bolje rješenje za prikaz mehaničkih i termomehaničkih ponašanja polikristalnih materijala u elastičnom režimu dan je Kelvin-Voigtov model što potiče njegovu primjenu na aluminij. Postoje modeli više serijski spojenih Kelvin-Voigt elemenata od kojih svaki opisuje određeni tip deformacijskog odgovora. Primjerice, reološki model dva serijski povezana elementa, razvijen od Torić i Burgess [26], gdje prvi element opisuje mehaničku, a drugi viskoznu komponentu deformacije uzrokovanu puzanjem, dok je termalna deformacija ovisna samo o temperaturi izostavljena. Verifikacija svakog od modela konstitutivnih komponenti kao i modela u cjelini provedeni su eksperimentalnim podacima iz različitih izvora studija [27] te na vlastitim ispitivanjima čelika klase S275 u rasponu 400°C-600°C odnosno ispitivanjima na aluminijскоj leguri 6082-T6 pri rasponu 200°C-300°C [18, 27]. Uz odgovarajuću kalibraciju, model se smatra primjenjivim na bilo koju gradaciju ugljičnih čelika, S235-S355, te se može smatrati kao baza univerzalnog reološkog modela metala koje karakterizira puzanje pri povišenim temperaturama.



Slika 1. Sheme opruge, prigušivača, Kelvin-Voigtovog i Maxwellovog modela

4. Zaključak

Posljednjih desetljeća, aluminij se sve češće primjenjuje u inženjerskim područjima, posebno zbog omjera nosivosti i vlastite težine te izvrsne otpornosti na koroziju. S obzirom na benefite aluminija, cilj rada je potaknuti učestaliju upotrebu u građevinarstvu. Aluminij predstavlja skupine legure različitih svojstava i ponašanja, s dodatnim razlikama legura unutar skupina. Zbog mnogobrojnih razlika aluminijских legura, uz istraživanja pojedine legure potrebno je izvršiti i komparativne analize. Kako bi se reducirao nedostatak bitnih informacija za nosive elemente, provest će se analiza puzanja u elementima od aluminijских legura. Uz jasno naglašenu problematiku požarne otpornosti, poseban fokus bit će na takvim analizama. S ciljem redukcije skupih i složenih eksperimentalnih ispitivanja, ključne parametre je potrebno istražiti numeričkim analizama. Dan pregled motivira razvoj univerzalnog reološkog modela za aluminijske konstrukcije izložene ekstremnim uvjetima, uključujući sve vremenski ovisne komponente deformacije. Potrebno je odrediti i uzeti u obzir sve ključne termomehaničke varijable poput temperature i njenog prirasta, naprezanja i brzinu deformacije. Nakon eksperimentalne analize ponašanja legura na visokim temperaturama, razvijat će se modeli puzanja prikladni tim legurama i poopćen model svim aluminijским legurama korištenim u građevinarstvu odnosno bit će definiran reološki model za procjenu opsega oštećenja i preostalih mehaničkih svojstava aluminijских elemenata nakon izlaganja požaru.

Literatura

- [1] Aluminium - The Green Metal, 2012. Hazlemere, (<https://www.hazlemerecommercial.co.uk/blog/aluminium-the-green-metal/2012/04/>), pristupljeno: 12.5.2025.
- [2] EN 1999-1-1 (2007) (English): Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
- [3] Maljaars, J., Soetens, F., Snijder, H. H.: Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 1: Tests, Thin-Walled Structures, 47-11, 2009, (1404–1417), DOI: [10.1016/j.tws.2009.02.008](https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.02.008)
- [4] Maljaars, J., Soetens, F., Katgerman, L.: Constitutive model for aluminum alloys exposed to fire conditions, Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 39A-4, 2008, (778–789), DOI: [10.1007/s11661-008-9470-0](https://doi.org/10.1007/s11661-008-9470-0)
- [5] Sun, Y., Fu, Z., Song, Y., Xia, J.: Cross-Sectional Behavior of Aluminum Alloy Channel Section Stub Columns after Exposure to Fire, Journal of Structural Engineering, 149-7, 2023, DOI: [10.1061/jsendh.steng-12383](https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-12383)
- [6] Jiang, S., Xiong, Z., Guo, X., He, Z.: Buckling behaviour of aluminium alloy columns under fire conditions, Thin-Walled Structures, 124, 2018, (523–537), DOI: [10.1016/j.tws.2017.12.035](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.035)
- [7] Su, M. N., Young, B.: Material properties of normal and high strength aluminium alloys at elevated temperatures, Thin-Walled Structures, 137, 2019, (463–471), DOI: [10.1016/j.tws.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.012)
- [8] Liu, Y., Liu, H., Chen, Z.: Post-fire mechanical properties of aluminum alloy 6082-T6, Construction and Building Materials, 196, 2019, (256–266), DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.10.237](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.237)
- [9] Sun, Y., Zhang, K., Gong, G.: Material properties of structural aluminium alloys after exposure to fire, Structures, 55, 2023, (2105–2111), DOI: [10.1016/j.istruc.2023.07.027](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.07.027)
- [10] Megalingam, A., Ahmad, A. H., Alang, N. A., Alias, J., Naher, S.: Creep Behaviour of Aluminium 7075 Feedstock Billet Globular Microstructure at High Processing Temperature, Journal of Failure Analysis and Prevention, 24-3, 2024, (1324–1332), DOI: [10.1007/s11668-024-01917-7](https://doi.org/10.1007/s11668-024-01917-7)
- [11] Suzuki, J., Ohmiya, Y., Kohno, M., Yusa, S., Harada, K., Wakamatsu, T.: Evaluation of fire resistance for aluminum alloy members, AIJ Journal of Technology and Design, 16, 2002, (151-156), DOI: [10.3130/aijt.8.151_2](https://doi.org/10.3130/aijt.8.151_2)
- [12] Fogle, E. J., Lattimer, B. Y., Feih, S., Kandare, E., Mouritz, A. P., Case, S. W., Lattimer, B. Y.: Compression Load Failure of Aluminum Plates due to Fire, Engineering Structures Journal, 34, 2011, (155-162), DOI: [10.1016/j.engstruct.2011.09.014](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.014)
- [13] Maljaars, J., Soetens, F., Snijder, H. H.: Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 2: Finite element models, Thin-Walled Structures, 47-11, 2009, (1418–1428), DOI: [10.1016/j.tws.2008.06.003](https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.06.003)

- [14] Harmathy, T.Z.: A comprehensive creep model, *Journal of Basic Engineering*, 89-3, 1967, (496-502), DOI: [10.4224/40001531](https://doi.org/10.4224/40001531)
- [15] Maljaars, L., Twilt, L., Fellingner, J. H. H., Snijder H. H., Soetens, F.: Aluminium structures exposed to fire conditions-an overview, *Heron*, 55-2, 2010, (85-122)
- [16] Soyal, Z.: Creep of aluminum alloys exposed to fire conditions, University of technology Eindhoven - Master thesis, 2016.
- [17] Kandare, E., Feih, S., Kootsookos, A., Mathys, Z., Lattimer, B. Y., Mouritz, A. P.: Creep-based life prediction modelling of aluminium in fire, *Materials Science and Engineering: A*, 527-4-5, 2010, (1185–1193), DOI: [10.1016/j.msea.2009.10.010](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.10.010)
- [18] Torić, N., Glavinić, I. U., Burgess, I. W.: Development of a rheological model for creep strain evolution in steel and aluminium at high temperature, *Fire and Materials*, 42-8, 2018, (879–888), DOI: [10.1002/fam.2643](https://doi.org/10.1002/fam.2643)
- [19] Zheng, Y. Q., Zhang, Z.: The fire performance and fire-resistance design of aluminium alloy I-beams, *Fire and Materials*, 40-1, 2016, (141–157), DOI: [10.1002/fam.2275](https://doi.org/10.1002/fam.2275)
- [20] Li, Y., Hou, T., Huang, X., Gao, Y., Zeng, Y., Li, D.: Constitutive modelling of coupled creep deformation and age hardening behavior of aluminum alloys under various thermal and mechanical loadings, *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 2023, (333–353), DOI: [10.1016/j.jmrt.2023.05.183](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.183)
- [21] Sun, Y., Cheng, W., Chen, K.: Experimental study of in-fire and post-fire material response of high-strength aluminium alloys, *Journal of Building Engineering*, 91, 2024, DOI: [10.1016/j.jobbe.2024.109581](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109581)
- [22] Yun, X., Wang, Z., Gardner, L.: Full-Range Stress–Strain Curves for Aluminum Alloys, *Journal of Structural Engineering*, 147-6, 2021, DOI: [10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002999](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002999)
- [23] Spigarelli, S., Sandström, R.: Basic creep modelling of aluminium, *Materials Science and Engineering: A* 711, 2018, (343–349), DOI: [10.1016/j.msea.2017.11.053](https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.053)
- [24] Helman, H., Creus, G. J.: A NON-LINEAR RHEOLOGICAL MODEL DESCRIBING TIME-DEPENDENT DEFORMATIONS AND FAILURE, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 10, 1975, (167-172), DOI: [10.1016/0020-7462\(75\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0020-7462(75)90034-7)
- [25] Chindam, C., Venkata, K. C., Balasubramaniam, K., Prakash, R. V.; Thermomechanical response of metals: Maxwell vs. Kelvin-Voigt models, *Materials Science and Engineering: A* 560, 2013, (54–61), DOI: [10.1016/j.msea.2012.08.152](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.152)
- [26] Torić, N., Burgess, I. W.: A unified rheological model for modelling steel behaviour in fire conditions, *Journal of Constructional Steel Research*, 127, 2016, (221–230), DOI: [10.1016/j.jcsr.2016.07.031](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.031)
- [27] Torić, N., Burgess, I.: Rheological modelling of high-temperature stationary creep tests of Grade S275JR steel, *ce/papers*, 4, 2021, (546-550), doi: [10.1002/cepa](https://doi.org/10.1002/cepa)