



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

*Procjena materijalnih svojstava i ponašanja
konstruktivnih aluminijskih legura u slučaju
djelovanja požara*

Domagoj Bendić

Split, studeni 2025.

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Aluminijski materijal	1
1.2. Konstrukcije u požaru	5
1.3. Otpornost aluminijskih konstrukcija u požaru	7
1.4. Propisi – Norme – Europski zahtijevani standardi	9
2. Pregled istraživanja	10
2.1. Eksperimentalna ispitivanja na aluminiju	10
2.2. Procjena svojstava i ponašanja aluminijskih legura	14
2.3. Reološko modeliranje aluminija	18
3. Diskusija	19
4. Smjernice i ciljevi istraživanja	22
4.1. Eksperimentalna ispitivanja na aluminiju	22
4.2. Razvoj novog modela	24

1. Uvod

1.1. Aluminij kao materijal

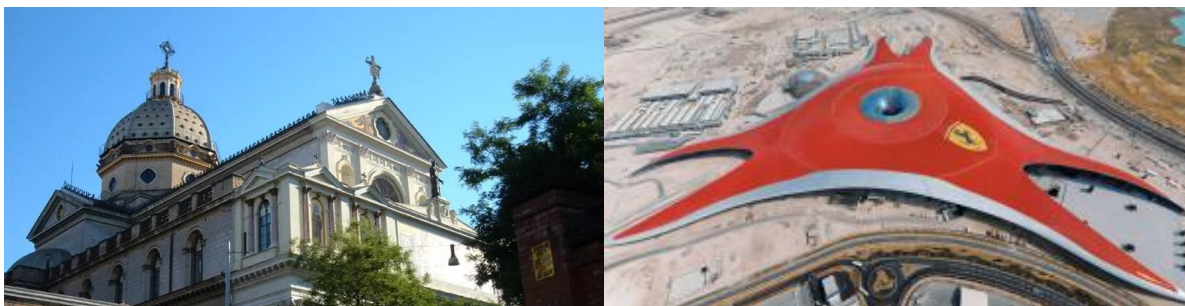
Unatoč tome što je aluminij treći najrasprostranjeniji element u zemljinoj kori, postojanje elementa aluminija otkriveno je tek početkom 19. stoljeća, čineći ga relativno novim materijalom. Kada je predstavljen u čistoj formi, smatran je plemenitim metalom skupljim od platine. S obzirom da kao čist metal ima loša mehanička svojstva, za primjenu aluminija u nosivim konstrukcijama bilo je potrebno razviti odgovarajuće legure. Legiranjem aluminija ovisno o legirnom elementu postižu se različite legure odnosno skupina legura aluminija s karakterističnim mehaničkim svojstvima. U konstruktivne svrhe moguće je koristiti samo pogodne i dokazane legure, zadovoljavajuće čvrstoće, otpornosti na koroziju, s dobrom zavarljivošću i u skladu s potrebama pojedinog projekta. U 20. stoljeću aluminijske legure počinju se primjenjivati u nosivim konstrukcijama, a danas aluminij uz čelik čini najznačajniji metal za primjenu u nosivim konstrukcijama u građevinarstvu. Zbog karakterističnih svojstava, tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, aluminijske legure sve više su u uporabi u građevinskoj industriji. Za razliku od čelika aluminij nije feromagnetičan, ne hrđa te se može koristiti bez boja i premaza, a jedna od razlika koja ga čini izuzetno povoljnim za korištenje je i gustoća koja je jednaka trećini gustoće čelika, što rezultira mnogo lakšim konstrukcijama (tablica 1.). Mehanička svojstva aluminija poboljšavaju se snižavanjem temperature te nije sklon krtom lomu pri niskim temperaturama kao što je to slučaj s čelikom. S obzirom da je estetski atraktivnog izgleda, a kako ne zahtijeva dodatne zaštitne premaze, izuzetno je popularan i u ne-nosivim fasadnim sustavima. Dodatna prednost aluminija je i napredak proizvodnih procesa te mogućnost potpunog recikliranja aluminijских legura pogodnih za konstruktivnu namjenu, što ga čini izuzetno održivim [1]. Prema podacima Vijeća za aluminij u gradnji, 2008. godine u uporabi je bilo 75% aluminija proizvedenog od kraja 19. stoljeća, a procjenjuje se da će između 70% i 98% aluminija koji se koristi u današnjim konstrukcijama biti reciklirano [2]. Svakako je bitno naglasiti da se osnovna svojstva aluminija ne mijenjaju u procesu reciklaže. Sam proces proizvodnje je izuzetno poboljšán u odnosu na kraj 20. stoljeća, čime se u proizvodnji aluminijских legura smanjilo zahtjeve potrošnje energije za više od 75%, što je dovelo do smanjenja emisija stakleničkih plinova (ugljičnog otiska) za skoro 40% [3]. Također, prigodne legure lako se mogu ekstrudirati i u složenije oblike poprečnog presjeka, što nije slučaj s korištenjem ustaljenih materijala poput čelika ili betona.



Slika 1. The Crystal, London – krov izrađen od 100% recikliranog aluminija [4]

Jedna od prvih primjena aluminija zabilježena je na Washingtonovu spomeniku u Washington D.C.-u, Sjedinjenim Američkim Državama, 1884. godine. Ukupna količina tada iznimno rijetkog i skupog materijala upotrebljena je za izradu vrha stupa i iznosila je nešto ispod 3 kilograma [5]. U dvadesetim godinama 20. stoljeća procesom elektrolize smanjuju se troškovi proizvodnje aluminija za 80% te se javlja prva konkretnija primjena aluminija. Osnovni nosivi dijelovi zgrade, kao i interijer Empire State Buildinga, izgrađenog 1931. godine, izrađeni su upravo od aluminija [6].

Najstarijom primjenom aluminija u gradnji smatra se oblaganje kupole crkve San Gioacchino u Rimu, u Italiji, neobrađenim aluminijskim limovima 1898. (slika 2.a) [7]. Današnji je primjer impozantnog aluminijskog krova zabavnog parka Ferrari World u Abu Dhabiu, u Ujedinjenim Arapskim Emiratima, sa površinom od 200 000 m² (slika 2.b) [8].



Slika 2. a) Crkva San Gioacchino u Rimu [7]; b) Ferrari World u Abu Dhabiu [8]

S obzirom na malu težinu i otpornost na koroziju, najčešća primjena u građevinarstvu odnosi se na konstrukcije koje se nalaze u vlažnim i korozivnim sredinama, konstrukcije na nedostupnim mjestima odnosno na one koje iziskuju posebne Transporte i krovne sustave velikih raspona kod kojih su promjenjiva opterećenja mala u odnosu na stalna. Stambena zgrada The Wave u Almereu, u Nizozemskoj, ima atraktivnu valovitu aluminijsku fasadu (slika 3.) gdje je zbog zahtjevanih oblika i s obzirom na visok sadržaj soli i vlage aluminij bio idealan izbor. Konstruktivni elementi su betonski [9].



Slika 3. Stambena zgrada The Wave, Almere, Nizozemska [9]

Most Arvida (slika 4.) iz 1950. godine je prvi most na svijetu izgrađen u cijelosti od aluminija. Ukupna masa mosta iznosi 163 tone, što je manje od polovice mase istovjetnog mosta kada bi bio izrađen u čeliku [10]. I danas nosi titulu aluminijanskog mosta s najvećim glavnim rasponom od 91.5 m, a slijede ga pješački mostovi glavnih raspona 50 do 65 m [11].



Slika 4. Most Arvida, Quebec, Kanada [10]

U izgradnji mostova, s obzirom da nedostaci postojećeg standarda ograničavaju razvoj, najčešće se aluminij koristi u izradi pješačkih mostova. Analiza izvršena na 9 primjera aluminijanskih rešetkastih mostova u Kini [12] nastoji opravdano doprinijeti primjeni aluminija. Na slici 5. prikazan je aluminijanski pješački most u Kanadi, raspona 44m, montiran iz tri segmenta u samo jednom danu.



Slika 5. Aluminijanski pješački most, Brossard, Kanada [13]

Prema trenutačnim podacima, građevinska industrija u svijetu koristi 25% globalne proizvodnje aluminija [14].

Aluminijске legure se generalno klasificiraju u dvije grupe: gnječive (kovke) legure koje se tope u peći a potom oblikuju izlivanjem u kalupe, i lijevane legure koje se primarno obrađuju u čvrstom stanju. Finalni oblik gnječivih legura postiže se raznim postupcima valjanja, kovanja, istiskivanja i slično. Klasifikacija ovisi o mogućnosti toplinske obrade, osobito za serije koje mogu podlijetati toplinskoj obradi poput serije 6xxx. Kovke legure svrstavaju se u devet serija, ovisno o kombinaciji legiranih elemenata. U oznaci serije prva znamenka označava izvornu leguru, dok druga znamenka predstavlja modifikacije proizašle iz izvorne legure. Zadnje dvije znamenke isključivo su nomenklaturnog karaktera.

**KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT
DOMAGOJ BENDIĆ, STUDENI 2025.**

Ovim radom obratiti će se pozornost ponajviše na gnječive (kovke) aluminijske legure s glavnim legirnim elementima magnezija i silicija, brojčane oznake EN AW 6xxx odnosno kemijskog simbola AlMgSi. Uloga magnezija je poboljšanje korozijske otpornosti i otpornosti u alkalnim otopinama. To su najčešće korištene legure, dobro se zavaruju i oblikuju plastičnom deformacijom uz dobra antikorozijska svojstva. Za konstrukcijsku primjenu u nizu legura 6xxx prikladne su legure EN AW-6082, EN AW-6061, EN AW-6005A, EN AW-6106, EN AW-6063 i EN AW-6060, sve svrstane u razred trajnosti B [15].

Tablica 1. Usporedba mehaničkih karakteristika čelika i aluminija pri sobnoj temperaturi

Materijalna svojstva pri sobnoj temperaturi	Čelik (EN 1993-1-1)			Aluminij (EN 1999-1-1)	
	S235	S275	S355	6060 T66	6082 T6
Gustoća [kg/m ³]	≈ 7850			≈ 2700	
Jedinična težina [kN/m ³]	≈ 78.5			≈ 27	
Modul elastičnosti [MPa]	210 000			70 000	
Poissonov koeficijent	0.3			0.3	
Modul posmika [MPa]	≈ 81 000			≈ 27 000	
Karakteristična vlačna čvrstoća [N/mm ²]	360	430	490	215 (110)	300 (185)
Koeficijent toplinskog razvlačenja [K ⁻¹]	12 · 10 ⁻⁶			23 · 10 ⁻⁶	
Toplinska provodljivost [W/m°C]	~ 54			~ 240	
Specifična toplina [J/kg°C]	~ 440			~ 920	
Talište [°C]	1425-1540			660	

Iz serija kovkih toplinski obradivih legura, često se bira EN AW-6082 iz razreda trajnosti B. Karakterizira je velika čvrstoća, kategorija I/II [15], dostupna je u obliku cijevi, šipki, punih ili šupljih istisnutih profila, ploča, limova i traka. Svojstva i ponašanje ove legure detaljno su ispitani na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu (Torić et al. [16]). Ispitivanjem su odredili karakteristike aluminija naspram čelika te na taj način otvorili vrata njegovoj učestalijoj upotrebi u građevinarstvu.

Prednostima korištenja aluminijskih legura u području građevinarstva bave se Formisano et al. [17], ističući visok potencijal primjene tog materijala u vidu ekstrudiranja složenih oblika, ponašanje spojeva i uređaja za seizmičku zaštitu okvirnih čeličnih konstrukcija.

S obzirom na potrebe daljnjih istraživanja, ali i dostupnost zahtijevane legure, posebna pozornost dat će se EN AW 6060 T66 koja također pripada razredu trajnosti B ali II/III razredu čvrstoće. Izvornoj leguri iz serije 6xxx, rastvorno žarenoj i umjetno dozrijevanoj kojoj se kroz kontrolu propisanog postupka postižu bolja mehanička svojstva u odnosu na istu leguru tempera T6. Za razliku od EN AW-6082, nije dostupna u obliku limova, traka i ploča, te nije pogodna za kovanje.

1.2. Konstrukcije u požaru

Sve veću pozornost pridaje se ekstremnim djelovanjima na konstrukcije, a požar se s obzirom na mogućnosti nastanka i tip djelovanja svakako svrstava u jedno od njih. Kao požar definira se svaki proces gorenja koji se nekontrolirano širi, a uslijed kojeg može doći do ozljeđivanja ljudi ili oštećenja materijalnih dobara. Nažalost, najčešće nesreće dovedu do uzimanja u obzir pojedinih izvanrednih opterećenja pa je tako do većih promjena u propisima o zaštiti od požara pokrenula tragedija u Sao Paulo, u Brazilu, 1974. godine, kada je u požaru poslovne zgrade stradalo 179 osoba.

U izvještajima istrage napada na tornjeve Svjetskog trgovačkog centra, s obzirom da je projektiranjem predviđena mogućnost udara zrakoplova, zaključeno je da je upravo požar odnosno dugotrajno izlaganje nosivih elemenata visokim temperaturama vjerojatan razlog zašto su se neboderi urušili. Naime, pri udaru je oštećena protupožarna zaštita čeličnih nosivih elemenata, koja je dovela do kolapsa konstrukcije u vremenu ispod 60 minuta.



Slika 6. Grand Kartal, Turska [18]

U požaru na hotelu Grand Kartal na skijalištu u Turskoj (slika 6.) u siječnju 2025., poginulo je 79 ljudi. Pretpostavlja se da su glavni uzroci katastrofe u ovim razmjerima neadekvatan protupožarni sustav koji nije sadržavao sustav sprinklera te je fasada unatoč tome što je kategorizirana kao negoriva prenijela vatru na gornje katove [19].

Nemoguće je predvidjeti gdje i kada će nastati požar, stoga su nužne preventivne mjere koje će osigurati dostatnu sigurnost u slučaju pojave požara. Požar se kao takav ne može striktno definirati stoga je potrebno sagledati širu sliku istraživanja, počevši od materijala, tipa konstrukcije i samog definiranja požarnog opterećenja. Djelovanja na konstrukciju u požaru, u postupku gašenja te redukciju svojstava po izloženosti požaru svakako se trebaju sagledati već

na razini materijala. Iako su konstruktivni metali poput čelika i aluminija negorivi te ne dolazi do degradacije presjeka nosivih elemenata kao takvih, djelovanje požarnog opterećenja manifestira se kroz degradaciju mehaničkih svojstava materijala. Sigurnost pojedine konstrukcije ovisi o mnogo faktora o kojima treba voditi računa već kod projektiranja kako bi bili sigurni da konstrukcija neće otkazati barem onoliko koliko je potrebno za sigurnu evakuaciju svih korisnika. Da bi se zaštitilo ljudske živote i materijalnu imovinu, svakako treba pristupiti daljnim istraživanjima kako bi uz dosadašnje iskustvo i opisana saznanja unaprijedili sigurnost građevine u slučaju požara.

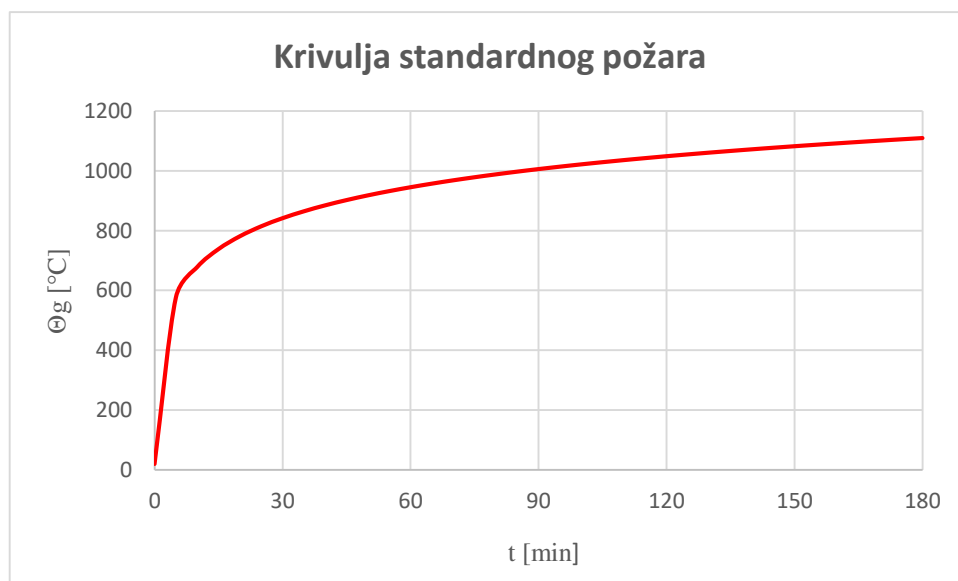
Problematika požara, kao izvanrednog djelovanja na nosivu konstrukciju, zastupljena je u sedam od deset eurokodova. Za površine izložene požaru, toplinsko djelovanje dano je neto tokom topline koji uzima u obzir prelazak topline strujanjem (konvekcijom) i zračenjem (radijacijom). Temperatura plina proračunava se usvajanjem nazivne krivulje temperatura-vrijeme ili u skladu s požarnim modelom.

Primjerice temperatura plina u požarnom odjeljku, u stupnjevima celzijusa, zadana nazivnom krivuljom standardnog požara definirana je logaritamskim izrazom:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

gdje je t – vrijeme u minutama [20].

Unosom vrijednosti u navedeni izraz, dobije se graf krivulje standardnog požara prikazan na slici 7.



Slika 7. Nazivna krivulja standardnog požara

Naravno, proračun toplinskih djelovanja moguć je i primjenom adekvatnih fizikalnih modela kojima se predviđa proračunska vrijednost požarnog opterećenja ovisna o namjeni prostora kojom se tada odredi i karakteristična gustoća po površini poda projekta za koji se određuje požarno opterećenje. Usvojeni model proračuna konstruktivnog sustava prema normi mora voditi računa i o ponašanju konstrukcije u požaru odnosno očekivano ponašanje njenih konstruktivnih elemenata i spojeva. Cjelokupan prikaz proračuna dokaza požarne otpornosti

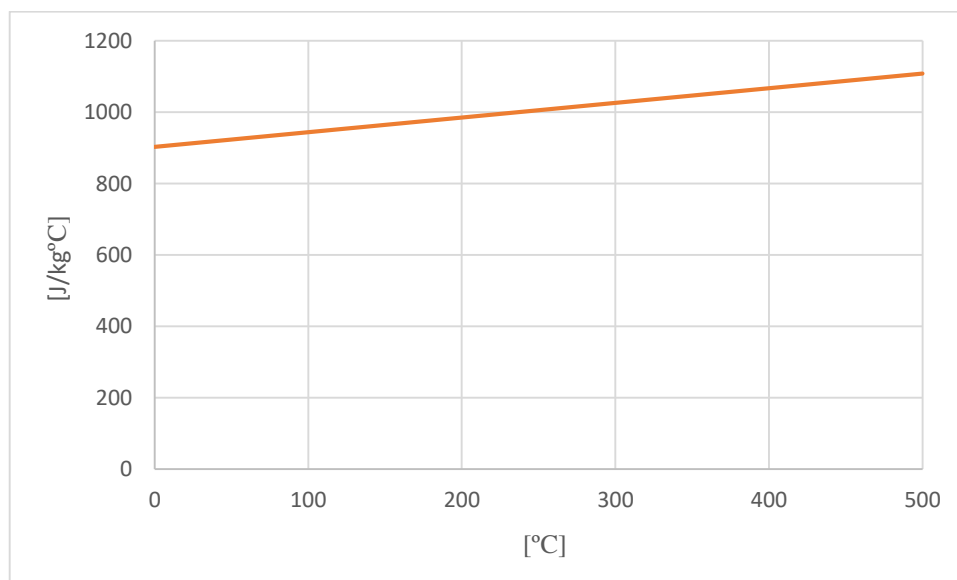
na primjeru čelične krovne konstrukcije sportske dvorane „Spaladium Arene“ obradili su Peroš i Boko [21].

1.3. Otpornost aluminijskih konstrukcija u požaru

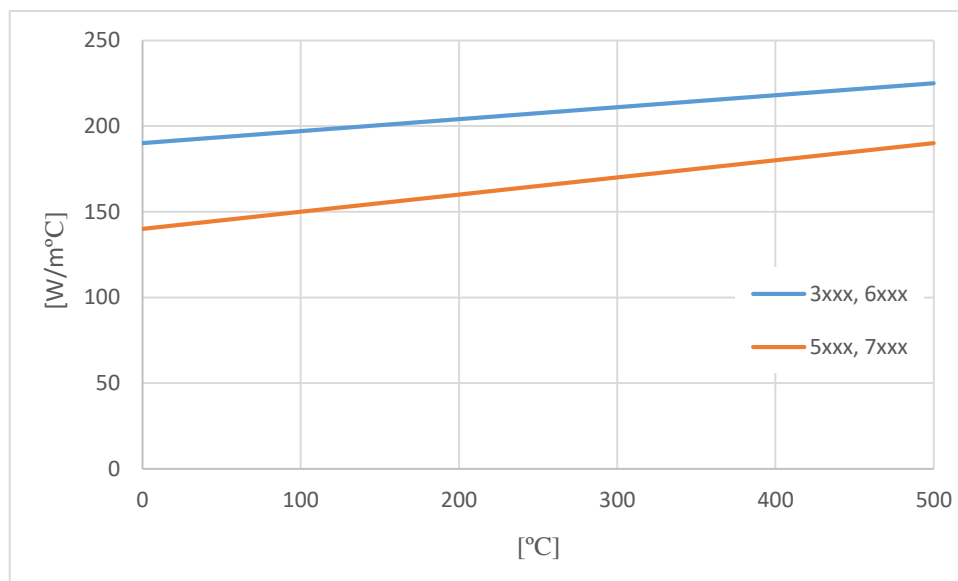
Za konstrukciju projektiranu na požar, određuje se mehanička otpornost za mjerodavnu izloženost požaru pri kojoj će nosiva konstrukcija očuvati svoju funkciju na mjerodavnu kritičnu temperaturu odnosno vrijeme. Ljudi moraju biti u mogućnosti evakuirati se prije nego konstrukcija doživi kolaps. Normama se propisuju tipična vremena otpornosti na požar od 30, 60, 90 i 120 minuta.

Aluminijske legure imaju nižu temperaturu taljenja odnosno aluminijske konstrukcije imaju sniženu otpornost na požar. Mehanička svojstva aluminija pri visokim temperaturama degradiraju brže nego što je to slučaj kod čelika. Kod pojedinih legura dolazi do degradacije mehaničkih svojstava već pri temperaturama višima od 100°C. Značajne degradacije mehaničkih svojstava aluminijskih legura javljaju se pri temperaturama višima od 200°C. Konstitutivno ponašanje aluminijskih legura pri povišenim temperaturama uvelike je pod utjecajem vremenski ovisnih deformacija - puzanja.

Kako razvoj temperature u nekom materijalu ovisi o toplinskim svojstvima toga istog materijala, važno je proučiti specifični toplinski kapacitet (slika 8.) te koeficijent toplinske vodljivosti (slika 9.) aluminija u ovisnosti o temperaturi. Vidljiv je problem požarne otpornosti konstrukcija od aluminija zato što se u slučaju požara, a zbog visoke vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti, temperatura u konstruktivnim elementima od aluminijskih legura puno brže širi, dovodeći do relativno brze redukcije nosivosti elemenata. Međutim, aluminij kao dobar reflektirajući materijal, ima dva puta manju površinu emisije u odnosu na ugljični čelik [22].

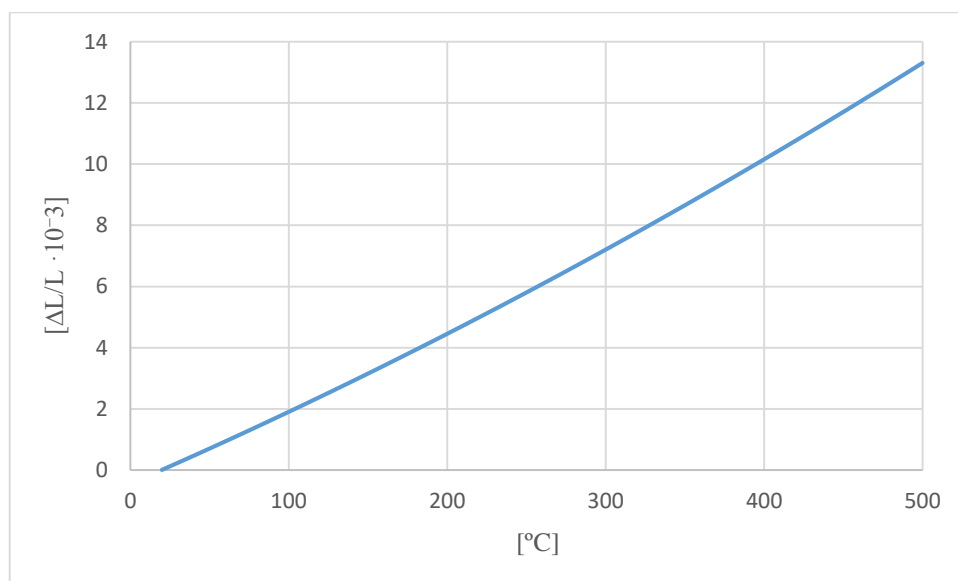


Slika 8. Specifični toplinski kapacitet aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi



Slika 9. Koeficijent toplinske vodljivosti aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi

Relativna toplinska deformacija odnosno izduženje u ovisnosti o temperaturi, sa gornjom granicom od 500 °C definirana je normom i može se iskazati kao na slici 10.



Slika 10. Relativno toplinsko izduženje aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi

Ispitane vrijednosti redukcije mehaničkih svojstava može se iščitati vrijednostima omjera za dogovornu granicu popuštanja pri povišenim i onih pri sobnim temperaturama a koje su dane Eurokodom. Vrijednosti su definirane do temperature od 550°C pri izloženosti toplini na vrijeme od dva sata. Ista problematika ispitana je i za modul elastičnosti većine legure, a preostale tek trebaju biti dokumentirane budućim ispitivanjima.

Kada su metalni elementi izloženi temperaturama višima od 170 °C dulje od 30 minuta, potrebno je sagledati i učinke prolaznog toplinskog puzanja. Kod aluminijskih legura pri povišenim temperaturama pri određivanju otpornosti elementa na izvijanje u požaru u proračun se uvodi i dodatan faktor redukcije iznosa 1.2 [23].

1.4. Propisi – norme – europski zahtijevani standardi

U svijetu su u primjeni četiri međunarodna standarda za primjenu nosivih aluminijskih legura odnosno za projektiranje aluminijskih konstrukcija, a navedeni su u tablici 2.

Tablica 2. Međunarodni standardi za projektiranje aluminijskih konstrukcija

Međunarodni standardi za projektiranje aluminijskih konstrukcija		
Oznaka standarda		Naslov standarda (opis)
AA ADM-2020	[24]	Priručnik za projektiranje aluminija
Australski/Novozelandski standard: AS/NZS 1664:1997	[25]	Aluminijske konstrukcije
Europski standard: EN 1999:2007	[15]	Projektiranje aluminijskih konstrukcija
Kineski standard: GB 50429-2007	[26]	Pravila za projektiranje aluminijskih konstrukcija

U Europi nosive aluminijske elemente proračunava se u skladu modela koje daje Eurokod 9 i nacionalni dodaci. Dio 1-1 [15] daje opća pravila za konstrukcije, a dio 1-2 [20] daje pravila za projektiranje konstrukcija otpornih na požar. Dijelovi od 1-3 do 1-5 bave se specifičnim segmentima aluminijskih konstrukcija.

Proizvodnja podliježe postupcima kontrole gdje svaka kombinacija legure i tempera izvedena za pojedino tržište odnosno u skladu s pripadajućom normom, uz striktno zahtjeve u specifikacijama, definira pojedinu leguru. S obzirom na sve veću popularnost aluminija, Dokšanović et al. [27] bavili su se obradom rezultata zadanih normom u odnosu na one vrijednosti određene eksperimentalno kako bi što točnije procijenili mehanička svojstva. Na različitim aluminijskim legurama serije 6xxx, Montuori et al. [28], ispitivanjem savojne otpornosti pokazali su kako pravilnikom definirane vrijednosti mogu biti vrlo konzervativne u odnosu na one dobivene eksperimentalno.

Eurokod 3, dio 1-2 [29] predlaže općeniti model naprezanja-deformacije za čelik u požaru, a koji se sastoji od linearnog dijela, eliptičnog i platoa granice istezanja. Takav prijedlog modela sadrži i implicitnu komponentu puzanja, čiji su utjecaj istraživali Torić et al. [30] analizom bez utjecaja vremenski ovisnih deformacija - puzanja na čeličnim elementima. Zaključeno je da Eurokodom implicitno zadano puzanje nije dovoljno konzervativno da pokrije sve potencijalne brzine zagrijavanja koje se u slučaju djelovanja požara mogu pojaviti na nosivim elementima konstrukcije.

Kako je oblik tipične krivulje naprezanje-deformacija za aluminij različitog oblika od one za čelik, Eurokod 9, dio 1-2 [20], općeniti model za aluminij u požaru bazira na tipu krivulje koju predlažu Ramberg-Osgood [31].

Ponekad propisi zanemaruju karakteristične razlike između aluminija i čelika te primjenjuju slične metodologije. Dodatnim ispitivanjima i valoarizacijom mogu se upotpuniti kako bi se u obzir uzelo pojedinosti svakog materijala i konstrukcija [32].

Vrijednosti dogovorne granice popuštanja pri trajnoj deformaciji od 0.2% dane Eurokodom 9, dijelom 1-2, bazirane su na stacionarnim testovima. Po Maljaarsu i Katgermanu, podaci o čvrstoći trebali bi se temeljiti na nestacionarnim testovima jer trenutne vrijednosti su, ovisno o

leguri, nesigurne ili previše konzervativne pri projektiranju požarne otpornosti [33]. Tu bi tezu svakako trebalo dodatno ispitati usporedbom različitih tipova ispitivanja.

2. Pregled istraživanja

2.1. Eksperimentalna ispitivanja na aluminiju

Za mnoge konstrukcije u kojima je popularna uporaba aluminijskih legura, posebno karakterističnim primjenama aluminijskih legura u konstrukcijama s visokim rizikom od požara – primjerice stambene jedinice na platformama za bušenje, značajno je projektiranje provesti u skladu s EN 1999-1-2 [20] koji definira pravila za dimenzioniranje aluminijskih konstrukcija s potrebnom požarnom otpornosti. Ali, navedena norma primjerice ne sadrži modele za projektiranje uzimajući u obzir lokalno izvijanje.

Mnogi istraživački timovi rade s ciljem što potpunijeg razumijevanja svojstava aluminijskih legura i ponašanja konstrukcija izrađenih od istih. Georgantzia et al. [34] proveli su iscrpne obrade dosadašnjih spoznaja eksperimentalnih, numeričkih i analitičkih radova pod cijelim spektrom uvjeta i namjena aluminijskih legura.

Mnoge postojeće studije fokusirale su se na ispitivanje materijalnih svojstava aluminijskih legura i ponašanja konstrukcija od aluminija na sobnim temperaturama, ali njihov preformans i preostala nosivost po izloženosti temperaturnim opterećenjima slabo su istraženi. Tek mali broj studija objavljen je na temu stabilnosti u požaru, a cjelokupan pregled istraživanja iskazan je u tablici 3.

Jedan od začetnika teorijskog i eksperimentalnog istraživanja utjecaja puzanja na izvijanje aluminijskih stupova bio je Chapman [67], pokušavajući predvidjeti gubitak stabilnosti pri konstantome opterećenju. Izvijanje popularnih aluminijskih legura ispitivano je brojnim eksperimentima pri sobnoj temperaturi [42, 44, 45, 49, 51, 53, 55, 56].

Kaufman je usporedio rezultate vlačnih ispitivanja svojstava preko 150 aluminijskih legura i pripadajućih tempera pri različitim povišenim temperaturama. Ukazao je na to kako za većinu aluminijskih legura odnos modula elastičnosti pri povišenim temperaturama i pri sobnoj temperaturi ne opada jednako poput odnosa dogovornih granica popuštanja u navedenim uvjetima [68].

Da bi se istražilo vremenski ovisne deformacije ili naprezanja, posebno kada je materijal podvrgnut povišenim temperaturama, Shivakumar et al. [69] proveli su testove puzanja aluminijske legure 6061-T6 pri rasponu temperatura od 300°C do 400°C te pri različitim razinama naprezanja. Sličnom tematikom bavili su se Zhao et al. [70] na čeliku te Kumar et al. [71] na aluminiju pri temperaturi od 150°C. Spoznato je da oblik krivulje naprezanje-deformacija varira njihovom poveznicom ovisno o vrsti aluminijske legure. Nadalje, oblik krivulje naprezanje-deformacija jednake legure nije jednake forme kada je legura pri sobnoj temperaturi i kada je izložena požarnome opterećenju [33, 66].

**KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT
DOMAGOJ BENDIĆ, STUDENI 2025.**

Tablica 3. Eksperimentalna ispitivanja na aluminiju

ISPITIVANJA PRI SOBNOJ TEMPERATURI		
Tip ispitivanja	Materijal	Referenca
Vlačno	Al – 6xxx, 7xxx - T6	[35] (2009.)
Vlačno (i ciklička)	Al – 6082-T6, 7020-T6	[36] (2018.)
Vlačno	Al – 7075-T6	[37] (2021.)
Savijanjem*	Al – 6061-T6	[38] (2015.)
Savijanjem	Al – 6061-T6, 6063-T5	[39] (2017.)
Tlačno	Al	[40] (1997.)
Tlačno	Al – 6082-T4, 6082-T6	[41] (1997.)
Tlačno	Al – 6060-T4, 6060-T6	[42] (1997.)
Tlačno	Al – 6082-T4, 6082-T6	[43] (1999.)
Tlačno	Al – 6xxx	[44] (2000.)
Tlačno	Al – 6063-T5, 6061-T6	[45] (2006.)
Tlačno (i/ili savijanjem)*	Al – 6061-T6	[46] (2006.)
Tlačno (i/ili savijanjem)	Al – 6061-T6	[47] (2006.)
Tlačno*	Al – 6082-T6	[48] (2010.)
Tlačno	Al – 6xxx	[49] (2011.)
Tlačno*	Al – 6061-T6, 6063-T5	[50] (2014.)
Tlačno*	Al – 6061-T6, 6063-T5	[51] (2015.)
Tlačno (ekscentrično)	Al – 6082-T6	[52] (2016.)
Tlačno*	Al – 6061-T6, 6063-T5	[53] (2017.)
Tlačno (ekscentrično)*	Al – 6082-T6	[54] (2019.)
Tlačno*	Al – 6061-T6	[55] (2020.)
Tlačno*	Al – 7A04-T6	[56] (2020.)
Posmično*	Al	[57] (2020.)
Posmično	Al – 6061-T6	[58] (2021.)
ISPITIVANJA PRI POVIŠENOJ TEMPERATURI		
Tip ispitivanja	Materijal	Referenca
Vlačno	Al – 6082-T6	[16] (2017.)
Vlačno	Al – 6063-T5, 6061-T6	[59] (2019.)
Vlačno	Al – 6082-T6	[60] (2019.)
Vlačno	Al – 6xxx, 7020-T6	[61] (2020.)
Vlačno	Al – 6063-T5	[62] (2023.)
Tlačno*	Al – 6082-T6, 7108-T79	[63] (2000.)
Tlačno	Al – 5083-H111, 6060-T66	[64] (2009.)
Tlačno*	Al – 6061-T6	[65] (2018.)
Tlačno*	Al – 6063-T5	[66] (2023.)
*testovima prethodilo vlačno ispitivanje uzorka materijala kako bi mu se odredila mehanička svojstva		

Uz česte simulacije korištene paralelno s eksperimentalnim testovima kako bi se ispitala validnost istih, sve su popularnije metode simulacija programima poput ABAQUS-a gdje se izrađuju FE modeli ili numeričke analize koje se validiraju podacima dostupnim u literaturi [72-75]. Numeričke simulacije predstavljaju svojevrstan izazov, ali nadopunjuju ograničen broj podataka dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima na temelju kojih su modeli i kalibrirani. Krivulje naprezanje-deformacija dobivene ispitivanjem materijala prilagođene su te primijenjene u odgovarajućim modelima. Za simulaciju mehaničkih svojstava može se upotrijebiti Ramberg-Osgoodov model, koji prema Eurokodu definira odnos naprezanja i deformacija. Međutim, zbog poteškoća s konvergencijom, pojedini autori radije primjenjuju Hopperstadov eksponencijalni model, parametrima prilagođen R-O krivulji [72, 73].

Aluminijske legure karakterizira velika varijabilnost na konstitutivnoj razini, što se reflektira kroz različite vrijednosti Ramberg-Osgoodova eksponenta. Definirana konstantna materijalna svojstva omogućavaju brojne analize uz varijaciju bezdimenzionalnih parametara poprečnih presjeka i raspona. Puzanje se definira Dorn-Harmathyjevim modelom koji opisuje primarnu i sekundarnu fazu puzanja. Potrebno je odrediti materijalne karakteristike i svojstva za kalibraciju. Utjecaj naprezanja je uključen preko Zener-Hollomanova parametra, a utjecaj temperature iskazan je Arrheniusovim izrazom. Gustoća mreže ovisna je o sustavu, nije konstantna, te se u pravilu povećava u blizini presjeka gdje se javlja maksimalan moment.

Maljaars et al. [64] proveli su brojna eksperimentalna ispitivanja kako bi definirali odnose naprezanja i deformacija aluminijskih legura pri povišenim temperaturama te samo ponašanje legure u takvim uvjetima, stavljajući poseban naglasak na utjecaj puzanja materijala. U ispitivanjima, na leguri 6060-T66, potrebnima za određivanje mehaničkih svojstava varirali su veličinu raspona odnosno brzinu prirasta deformacije ovisno da li se radilo o ispitivanju do 0.2% granice tečenja ili o ispitivanju do loma, pritom vodeći računa i o temperaturi. Dokazali su da aluminij većinu svoje nosivosti gubi u temperaturnom rasponu od 175 do 350 °C, stoga je potrebno razmatrati pasivnu zaštitu od požara koja bi bila prikladna barem za navedeni raspon. Dodatno treba voditi računa i da bude dovoljno fleksibilna za deformacije koje se uslijed temperaturnog opterećenja mogu javiti. [76].

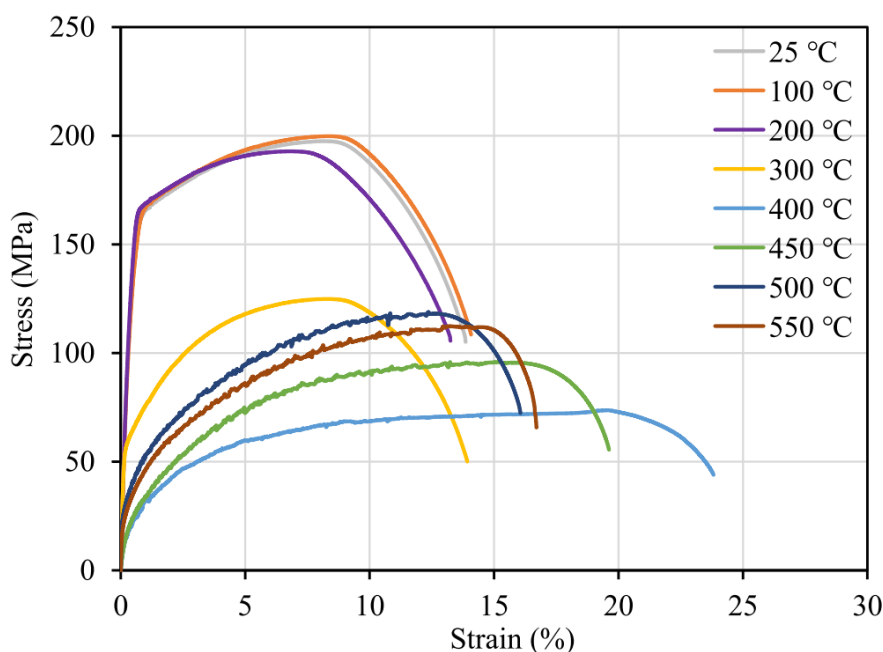
Jiang et al. [65] istraživali su ponašanje stupova, od aluminijske legure 6061-T6 pri tlačnome opterećenju i defektima proizšlima iz požara. Usvojeno je šest razina temperatura u visini do 400°C, uključujući sobnu temperaturu od 20°C. Po dostizanju ciljane temperature, a nakon kratke faze namakanja, izvršeni su tlačni testovi do otkaza.

Torić et al. [16] proveli su dva tipa eksperimentalnih testova kako bi dobili deformacije povezane naprezanjem i one povezane s puzanjem – stacionarni test puzanja. Prvi tip testa proveden je uz konstantnu brzinu prirasta naprezanja od 10 MPa/s na uzorcima koji su prethodno zagrijavani na način da uzorak postigne gotovo uniformnu temperaturu – proces zagrijavanja i zatim 30 minuta zadržavanja na konstantnoj temperaturi peći. Drugi tip primijenjen je za određivanje deformacija od puzanja, a proveden je uz jednoliko zagrijavanje uzoraka koji su na željenoj temperaturi zadržani 60 minuta te potom pri toj ciljanoj, konstantnoj, temperaturi opterećeni konstantnom razinom naprezanja u vremenskom intervalu do 20 sati. Po analizi legure EN AW 6082 T6 eksperimentalno iskazanim postupcima, određen je kritični interval temperatura za razvoj deformacije od puzanja u rasponu od 200 do 300 °C. Dodatno, predložen je analitički model deformacija zbog puzanja koji se pokazao adekvatan za prikaz rezultata testova deformacija uzimajući u obzir sve tri faze puzanja.

Liu et al. [60] bazirali su rad na aluminijskoj leguri 6082-T6 gdje su uzorci bili zagrijavani na osam različitih temperatura u rasponu od 100°C do 550°C i potom prirodno ohlađeni ili ohlađeni vodom što simulira gašenje vodom u požaru. Potom su provedena stacionarna vlačna ispitivanja preostalih mehaničkih svojstava pri sobnoj temperaturi.

Su et al. [59] vlačnim ispitivanjima proučavali su legure 6063-T5 i 6061-T6 pri temperaturama do 600°C. Inicijalna ispitivanja provedena su na temperaturi od 24°C. Provedeni su stacionarni i nestacionarni testovi, čije su dobivene vrijednosti uspoređene s američkim i europskim standardima.

Sun et al. [62] su na leguri 6063-T5 proveli testove zagrijavanja brzinom 15 °C/min u rasponu temperatura od 20 °C, koja predstavlja sobnu temperaturu i inicijalna mehanička svojstva, do 550 °C te postpožarno ispitivanje materijala. Po dostizanju ciljane temperature uzorci bi tijekom 30 minuta prošli fazu izlaganja testnoj temperaturi te bi bili ostavljeni da se prirodno ohlade. Geometrija uzorka i brzine prirasta opterećenja u skladu su s onima danim EN ISO 6892-1 [77]. Još jednom potvrđen je znatan utjecaj toplinskog djelovanja na svojstva konstruktivne aluminijske legure, posebno pri temperaturi višoj od 200 °C, te je predložen niz modela za procjenu preostalih svojstava. Dodatno su proveli i tlačna ispitivanja [66] na stupovima od istoimene legure te izložene jednakim uvjetima, pri čemu su ukazali na često zanemaren utjecaj očvršćivanja materijala.



Slika 11. Krivulje naprežanja-deformacije, na uzorku debljine 4 mm [62]

prijevod eng. *Stress* – Naprežanja; eng. *Strain* - Deformacije

Zbog svojih karakteristika aluminij se u zadnje vrijeme ispituje i u obliku kompozitnih greda od aluminijskih legura i betona kako bi se, za razliku od čelično-betonskih, uz smanjenu masu te probleme korozije i održavanja ispunili uvjeti nosivosti. Takvi kompoziti mogli bi pronaći primjenu u gradnji mostova velikih raspona i industrijskih objekata. Dodatno se provode istraživanja kompozita ojačanih polimernim vlaknima kako bi se izbjeglo pojavu površinske rupičaste korozije kojoj su neke legure sklone [78].

S obzirom na potrebe i primjenu, aluminijske legure ispituju se na svim razinama i u drugim srodnim strukama [79-81], što može doprinijeti proširenom pogledu ali rezultirajući stvarnim primjenama u graditeljstvu. Primjerice, Chybiński et al. [82] ispitali su uzorke EN AW 6060 T6 pod statičkim i dinamičkim režimima opterećenja te usporedili promjene na mikrostrukturi. Većina ispitivanja provedena je i na sobnim i pri povišenim temperaturama kako bi se uočile promjene na mikrostrukturi. Upravo legura EN AW 6060 zbog karakteristične mikrostrukture legure ima sklonost jamičastoj koroziji, no toplinskom obradom odnosno umjetnim dozrijevanjem poboljšava se korozijsko ponašanje [83, 84].

2.2. Procjena svojstava i ponašanja aluminijskih legura

Mikrostruktura aluminija formirana je u obliku kristalnih rešetki i samim time sklona pogreškama koje karakteriziraju njegova svojstva. Poseban tip pogrešaka su praznine, najčešće nastale toplinskom obradom metala, a koje omogućavaju difuzijsko gibanje atoma krutog metala.

Uslijed duljeg izlaganja metalnog materijala opterećenju javlja se fenomen puzanja, koji je posebno izražen ukoliko se odvija pri višim temperaturama. Generalno se deformaciju od puzanja, kao funkciju vremena, dijeli na primarnu fazu s opadajućom brzinom deformacije, sekundarnu fazu u kojoj je brzina konstantna i minimalna te tercijarnu fazu s rastućom brzinom deformacije sve dok ne dođe do loma. Deformacije od puzanja imaju značajan utjecaj na smanjenje čvrstoće i zato je tematika puzanja, osobito u požarnim uvjetima, bila atraktivna od same primjene aluminija.

Sami početci istraživanja deformacija od puzanja metalnih greda u nestacionarnim procesima zagrijavanja u požaru počinju s Harmathyjevim istraživanjem [85, 86]. Uvidio je važnost puzanja u procesima nalik požaru te izradio "prošireni" model na bazi izvorno predloženog Dornova modela puzanja [87], koji se već u pedesetim godinama 20. stoljeća zalagao za eksperimentalne verifikacije puzanja uz viđenje puzanja kao posljedicu mikrostrukturnih promjena uzrokovanih visokom temperaturom. Po Harmathyju analitičke i numeričke metode nisu bile dovoljno prilagođene praktičnim zahtjevima proračuna greda u procesima zagrijavanja, stoga predlaže svoj model, no idalje postoje ograničenja u vidu oblika raspodjele opterećenja.

Početkom 21. stoljeća Suzuki et al. [88] proveli su niz ispitivanja na stupovima i gredama od aluminijskih legura pri požarnome opterećenju da bi odredili odnos naprezanja i kritične temperature. Definirali su numeričke jednadžbe za predviđanje porasta temperature elementa odnosno jednadžbu procjene kritične temperature elementa izloženog zagrijavanju. Model je potvrđen eksperimentalno dobivenim podacima tijekom ispitivanja požarne otpornosti aluminijskih stupova i greda.

Maljaars et al. [89] uvidjeli su mane konstitutivnog modela kojeg predlaže Harmathy [85] odnosno slučajeve kada se isti ne može primijeniti. Razvili su model s konačnim elementima kao alat verifikacije konstitutivnog modela za aluminijske legure izložene požaru. Navode i da postojeći model nije reprezentativan za seriju legura 6xxx jer ju karakterizira rani razvoj tercijarne faze puzanja. Naime, Maljaars et al. [33] odabiru dvije učestale konstruktivne legure koje imaju drugačiji odziv na povišenim temperaturama, 5083-O/H111 i 6060-T66, za razvoj konstitutivnog modela modificiranjem postojećeg Dorn-Harmathy modela. Validacija je provedena nestacionarnim testovima koji simuliraju realan požar kojemu su izloženi zaštićeni aluminijski elementi. Testovi su provedeni uz zagrijavanje od 2,4 °C/min do 11 °C/min uz razine naprezanja od 20 do 100 N/mm².

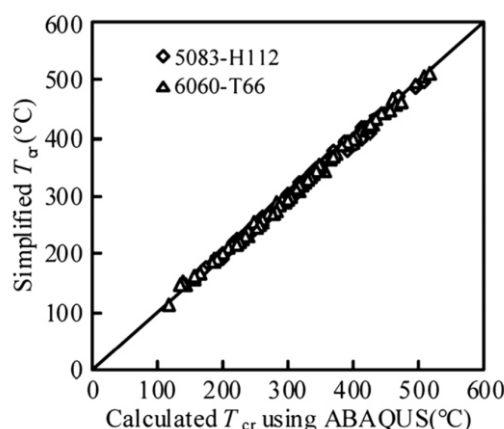
Već spomenuta ispitivanja Maljaars et al. [76] dovela su do modificiranog modela odnosa naprezanja-deformacija u nestacionarnome režimu za aluminijske legure izložene požarnom opterećenju, prvotno predloženog od Dorna odnosno Harmathyja. Maljaarsovo proširenje modela, uz prilagodbu parametara svojstvenih pojedinoj leguri, primjenjivao je i Soyol [90] koji ga je validirao nestacionarnim testovima s rastućom temperaturom i konstantnom ili promjenjivom silom. Dodatno upućuje na razlike zavarenih odnosno nezavarenih uzoraka.

Razlike u čvrstoći između zone utjecaja topline (eng. *Heat Affected Zone* - HAZ) i osnovnog materijala opadaju s porastom temperature, ali pri 300 °C i višima se podudaraju. Sličnu tematiku obradili su Kandare et al. [91] kada su prema izvornim prijedlozima Maljaarsa i suradnika izvršili analitičku provjeru kao podlogu za daljnja ispitivanja. Dodatno su implementirali parametre kako bi doradili model za procjenu otkazivanja tlačno opterećenih aluminijskih elemenata izloženih požaru. Prognoza temperature odnosno vremena početka ili vremena konačnog otkazivanja stupa validirana je ispitivanjima na aluminijskoj pločici. Stoga je, unatoč skladu eksperimentalnih i analitičkih rezultata, treba uzeti s oprezom.

Fogle et al. [92] predložili su jednostavan analitički model za predviđanje pojava otkazivanja u slučaju požaru, ali ne uzimajući u obzir utjecaj puzanja i početnih imperfekcija. Ispitivanja su provedena na pločama varirane geometrije pod tlačnim opterećenjem i izloženosti konstantnom toku topline.

Nastavno na istraživanja razvoja deformacija puzanja u čeliku, Torić et al. [93] proučavali su istu tematiku na aluminiju izloženom visokim temperaturama. Obradili su dislokaciju uspona na slobodnu susjednu ravninu klizanja kao najvažniji mehanizam deformacija od puzanja pri visokoj temperaturi. Izradili su reološki model uzimajući u obzir sve tri faze puzanja, s primjerom kalibracije na čelik klase S275 i aluminijsku leguru EN AW 6082-T6, primjenjiv na bilo koji metal koji karakterizira puzanje pri povišenoj temperaturi uz radom definirana ograničenja.

Zheng i Zhang [94] su na gredama izrađenima od aluminijskih legura 5083-H112 i 6060 T66 proveli istraživanja nezaštićenih i zaštićenih aluminijskih greda pri normalnim i pri visokim temperaturama. S obzirom na izrađene modele i provedena ispitivanja, ukazali su na konzervativan pristup kritičnoj temperaturi izračunatoj u skladu s Eurokodom 9. Predstavljene su pojednostavljene formule za prirast temperature odnosno, ovisno o leguri, proračun kritične temperature. Usporeda rezultata pojednostavljenih jednadžbi i vrijednosti dobivenih ABAQUS-om upućuju na dobro podudaranje rezultata (slika 12.). Pojednostavljeno dobiveni rezultati uspoređeni su i s eksperimentalno dobivenim podacima gdje se također vidi dobro slaganje, uz nešto konzervativnije, pojednostavljeno dobivene vrijednosti.



Slika 12. Usporedba kritične temperature [94]

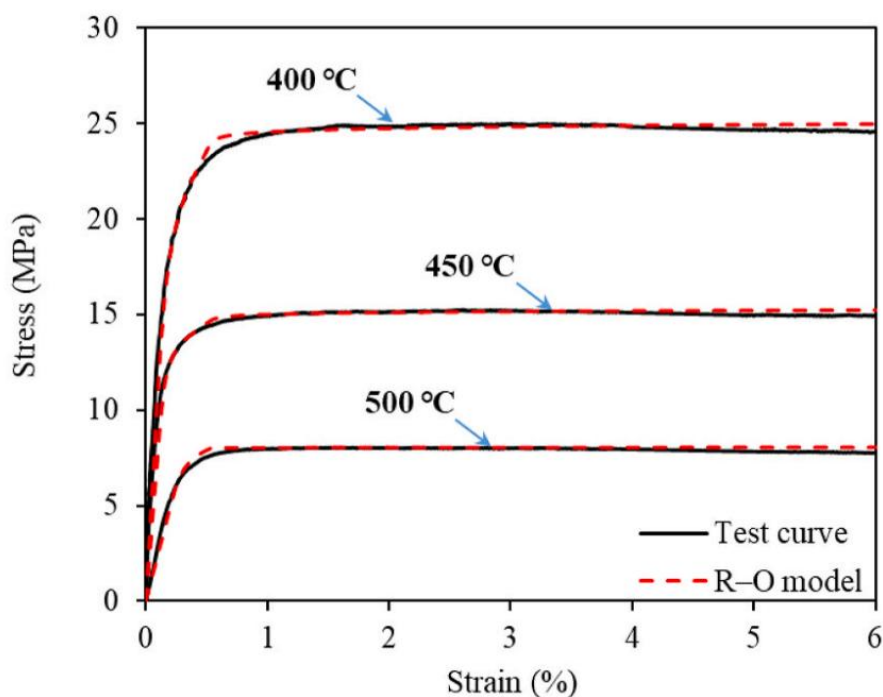
prijevod eng. *Simplified* – Pojednostavljeno; eng. *Calculated using ABAQUS* – Izračunato ABAQUS-om

Megalingam et al [95] proveli su ispitivanja pri konstantnoj temperaturi od 250 °C kako bi proučili ponašanje pri puzanju aluminijske legure 7075 uz visoke, konstantne uvjete naprezanja i pri visokim temperaturama. Za opisivanje puzanja korištena je Norton-Baileyjeva jednadžba koja povezuje prirast puzanja s primijenjenim naprežanjem, temperaturom i materijalnim karakteristikama. Ključnu ulogu u predviđanju puzanja ima eksponent deformacije koji je ovim radom određen kao $n=4.6$ za raspon naprezanja od 30 do 70 MPa i već navedenu temperaturu.

Modeliranjem odnosa deformacija puzanja i očvršćivanja starenjem pod različitim toplinskim i mehaničkim opterećenjima [96] definiran je cijeli set konstitutivnih modela ispitivanjem aluminijske legure AA7050 koji po prvi put ima sposobnost učinkovito predvidjeti ključna mikro i makrosvojstva bez obzira na različita inicijalna stanja i povijest opterećenja nekog elementa.

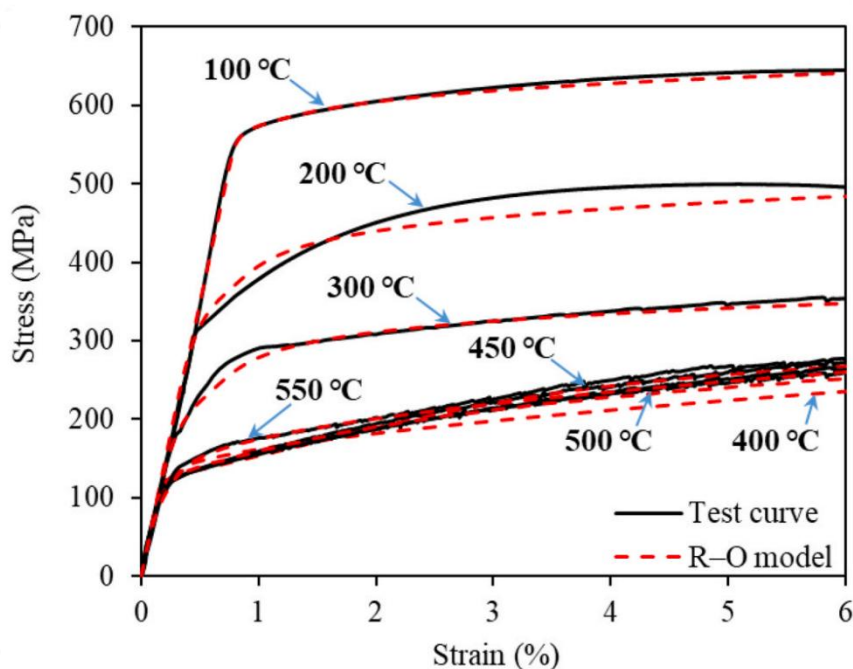
S obzirom na čestu uporabu legure 7075 u područjima visokih temperatura, ispitano je ponašanje eksponenta naprezanja u odnosu na temperaturu i naprežanje, kao i mehanizmi puzanja za koje se očekuje da dominiraju u takvim uvjetima [97, 98, 99]. Razvijeni su i konstitutivni modeli pri povišenim temperaturama [100, 101], zajedno s modelom puzanja za visokovrijedne aluminijske legure [102].

Sun et al. [103] proveli su opsežna ispitivanja na leguri 7075-T6 određivši krivulje i svojstva materijala tijekom i nakon požara u rasponu od 20 °C do 550 °C. Određeni su koeficijenti redukcije za navedenu leguru i temper te definirana serija modela za predviđanje krutosti i čvrstoće aluminijskih legura visokih čvrstoća tijekom požara i nakon njega. Smatrali su da izvorni Ramberg-Osgoodov model nije prikladan za definiranje cijelog opsega deformacija aluminijskih legura tijekom i nakon požara. Autori su razradili i prilagodili model autora Yun et al. [104] koji su na temelju baze podataka sastavljene od preko 700 krivulja naprežanje-deformacija pri sobnoj temperaturi predložili modificirani dvostupanjski Ramberg-Osgoodov model. Eksperimentalno određene krivulje naprežanja-deformacije, za svojstva tijekom požarnog djelovanja i nakon njega, uspoređene su s onima predviđenima temeljem objedinjenoga dvostupanjskog modela iz čije se dobre korespondencije potvrđuje njegova primjenjivost.



Slika 13. Usporedba izmjerenih i modelom predviđenih krivulja naprežanja-deformacije tijekom požara [103],

prijevod eng. *Stress* – Naprežanja; eng. *Strain* – Deformacije; eng. *Test curve* – Ispitna krivulja



Slika 14. Usporedba izmjerenih i modelom predviđenih krivulja naprežanja-deformacije nakon požara [103],

prijevod eng. *Stress* – Naprežanja; eng. *Strain* – Deformacije; eng. *Test curve* – Ispitna krivulja

Nabarro [105] je napravio opsežan pregled i otvorio mnoga pitanja i sumnje u uvjerljivost teorija modela čistih metala. Uvidio je razlike u zaključcima različitih skupina autora koji su ispitivali slične materijale vrlo sličnim metodama i uz slične uvjete ispitivanja. Unatoč tome, jednom od obrađenih teorija Spigarelli i Sandström [106], razvili su osnovni model puzanja prvotno razvijen za bakar i austenitni nehrđajući čelik, a potom primijenjen na čisti aluminij. Model ne uključuje nikakve podesive parametre već su svi unaprijed određeni stoga je potpuno predvidiv. Za procjenu razine puzanja potrebno je eksperimentalno odrediti sastav metala, naprezanje i temperaturu. Ovakav model ukoliko se dokaže dovoljno pouzdanim predstavlja izvrsnu bazu za daljnji razvoj na legurama aluminija očvršćivanih dozrijevanjem.

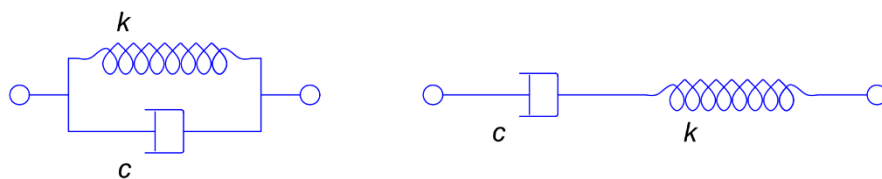
2.3. Reološko modeliranje aluminija

Za modeliranje mehaničkog ponašanje materijala s dovoljnom preciznošću, potrebno je analitički izraziti odnos između naprezanja i deformacije. Ukupni deformacijski proces metalnih materijala pri povišenim temperaturama, koji se sastoji od triju komponenti, pri čemu jedna predstavlja deformaciju puzanja, prikazan je 1980-ih u radu Anderberga [107].

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{\sigma}(\sigma, T) + \varepsilon_{c,r}(\sigma, T, t)$$

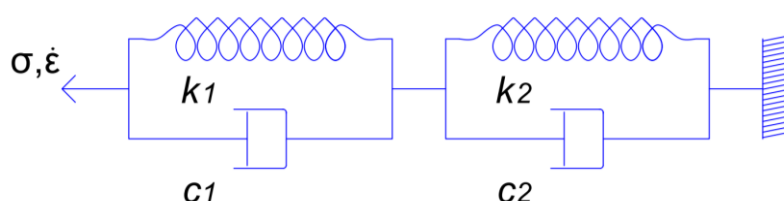
Predložena formulacija ukupne deformacije ε_{tot} opisuje se s termalnom komponentom $\varepsilon_{th}(T)$ koja ovisi samo o temperaturi, komponentom vezanom uz naprezanje $\varepsilon_{\sigma}(\sigma, T)$ ovisnoj o primijenjenom naprezanju i temperaturi, te komponentom deformacije puzanja $\varepsilon_{c,r}(\sigma, T, t)$. Potonja je najkompleksnija jer ovisi o naprezanju, temperaturi i vremenu.

Usklađenost određenog broja modela koji se predlažu za predviđanje pojedinih materijalnih karakteristika važan je korak u razvoju kvalitetnog reološkog modela. Među prvima, 1973. godine, to su uvidjeli Helman i Creus [108] koji su na primjeru betona predložili prvi reološki model za opisivanje nelinearnih deformacija i otkazivanja nosivosti. Razvili su izraze za trenutne i vremenske ovisne deformacije pri konstantnome naprezanju. Adekvatno su prilagodili eksperimentalne rezultate odnosno validirali elemente unutar modela na serijama pojedinačnih elemenata i izradili Kelvinov model sastavljen od opruge i prigušivača s pripadajućim konstantama. Chindam et al. [109] na čeliku su izvršili ciklička ispitivanja s naprezanjima ispod granice tečenja te promatrali utjecaj topline proizišle iz cikličkih procesa na materijal. Za simulaciju viskoelastičnih odgovora su koristili reološke modele Kelvin-Voigtova i Maxwelllova tipa. Ti modeli sastoje se od opruge i prigušivača koji su povezani serijski, odnosno paralelno, pri čemu elastičnu prirodu materijala simulira opruga, a viskoznost prigušivač. Iskazano je kako Kelvin-Voigtov model bolje opisuje promatrane mehaničke i termomehaničke odgovore polikristalnih materijala u elastičnom režimu opterećenja te je predložena provjera upravo na aluminiju.



Slika 15. Shematski prikaz Kelvin-Voigtova i Maxwelllova reološkog modela

Već su predloženi modeli serijski spojenih Kelvin-Voigtovih elemenata, pri čemu svaki od njih pokriva specifičan tip deformacijskog procesa. Torić i Burgess [110] razvili su reološki model sastavljen od serijski spojena dva Kelvin-Voigt elementa, pri čemu prvi predstavlja komponentu mehaničke deformacije, a drugi viskoznu deformaciju od puzanja. Model je sposoban iskazati dvije od triju komponenti ukupne deformacije pri bilo kojoj temperaturi. Izostavljena je komponenta klasične termalne deformacije, ovisna samo o temperaturi. Verifikacija je potvrđena prvo na brojnim eksperimentalnim rezultatima različitih izvora [111], a potom i na vlastitim ispitivanjima na čeliku klase S275 odnosno aluminijskoj leguri 6082-T6 [93, 111] uz kalibraciju elemenata svojstvima dobivenim na čeliku u rasponu 400°C do 600°C odnosno u rasponu 200°C do 300°C na aluminiju. Takav model, pod uvjetom adekvatnih kalibracija konstitutivnih komponenti, primjenjiv je na bilo koju vrstu i gradaciju ugljičnih čelika (S235-S355). Može se smatrati i da je navedeni model zapravo baza za univerzalan reološki model metala koje karakterizira puzanje pri povišenim temperaturama.



Slika 16. Shematski prikaz Torić-Burgessova modela [110]

3. Diskusija

Proučavajući aluminij, dolazi se do zaključka da ga se ne može promatrati kao jedan materijal. Aluminij predstavlja skupine legura različitih svojstava gdje se dodatno razlikuju mehaničke karakteristike legura unutar iste skupine. Konačne razlike ovise o pripadajućem temperu. Zbog toga istraživači sve više provjera izvode na različitim legurama uz iste uvjete ispitivanja. Montuori et al. [28] su s više od 100 eksperimentalnih ispitivanja aluminijskih legura 6060-T66, 6082-T6 i 6005A-T6 (15 provedenih i 86 prikupljenih iz literature), upozorili na konzervativnost normi. Guo et al. [61] proveli su 169 vlačnih testova legura 6082-T6, 6N01-T6, 6061-T6, 6061-T4 i 7020-T6 kako bi provjerili i komparirali njihove promjene svojstava s obzirom na temperaturu. Brojnim ispitivanjima otvaraju se neke nove teme koje je potrebno dodatno obraditi:

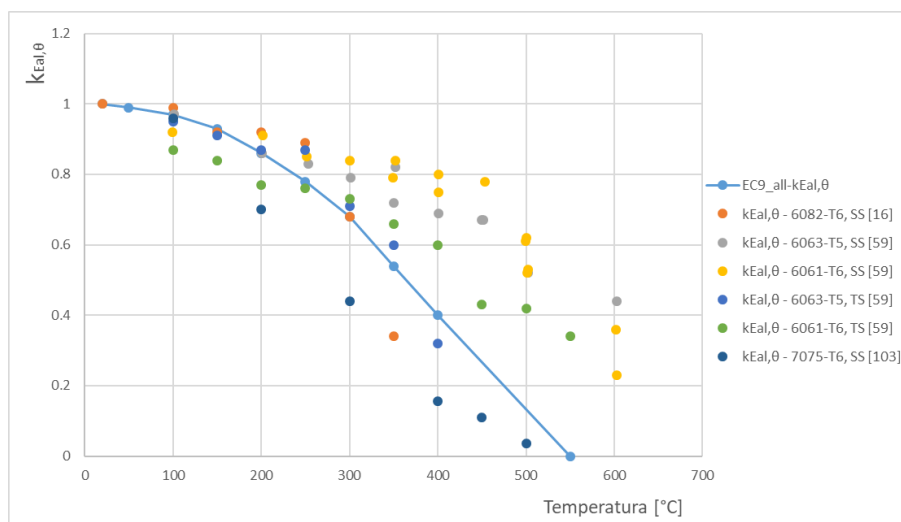
- Tlačnim ispitivanjima legura 5083-H111, 6060-T66 i 6063-T5 ukazano je i na neke ne toliko istraživane činjenice, poput porasta Poissonovog koeficijenta s porastom temperature [64] i često zanemarenog utjecaja očvršćivanja materijala kada je riječ o aluminijskim legurama [66].
- Iako su u prethodnim radovima određeni minimalni utjecaji duljine vremena izlaganja čeličnih elemenata testnoj temperaturi [60], a s obzirom da dulje vrijeme dovodi do izraženijeg razvoja puzanja kod aluminijskih elemenata, potrebno je provjeriti koliko čvrstoća ovisi o vremenu izloženosti [33].
- Maljaars i Katgerman smatraju podatke o čvrstoći iznesene u normama nedovoljno pouzdanim jer su određeni stacionarnim testovima koji su lošiji prikaz realne požarne situacije [33]. Međutim, u radu [59] izrazi za granicu tečenja validirani su rezultatima

ispitivanja u stacionarnome i nestacionarnome režimu te nisu uočene veće oscilacije u redukcijskim faktorima.

- Implicitno puzanje zadano europskim normama također se pokazalo neadekvatnim za pojedina djelovanja požara [30].
- Eurokod [20] sadržava koeficijente redukcije svojstava poput dogovorne granice popuštanja i modula elastičnosti, određenih dosadašnjim ispitivanjima pri povišenim temperaturama. Redukcijski faktori dani su za diskretne temperature, a za vrijednosti realne temperature potrebno je izvesti linearnu interpolaciju. Usporedbom s eksperimentalno određenim podacima smatra se da faktori nisu primjenjivi zbog nedovoljne točnosti, osobito vrijednosti faktora za predviđanje modula elastičnosti.

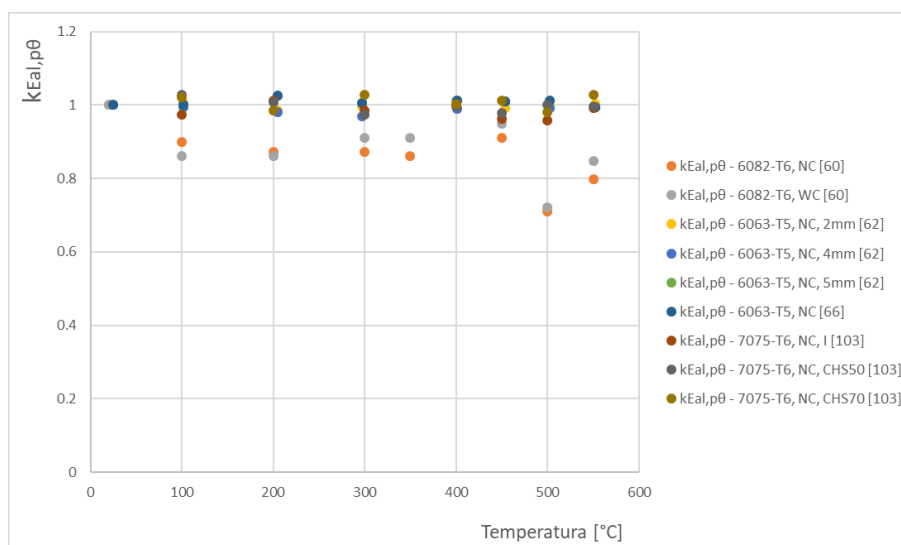
Za precizan i vjerodostojan prikaz krivulja naprezanje-deformacija neophodna su barem tri temeljna parametra materijala: granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i modul elastičnosti. Zato će posebna pažnja biti usmjerena na zadnju točku.

S porastom temperature znatno se samnjuje nosivost aluminijskih legura te je potrebno što kvalitetnije procijeniti preostala svojstva tijekom požara i nakon njega. Već osamdesetih godina 20. stoljeća uočene su znatne redukcije čvrstoće i modula elastičnosti aluminijskih legura pri povišenim temperaturama. Poznato je i da su uz razlike u obliku krivulja naprezanje-deformacija među legurama, znatne razlike i oblika krivulje iste legure pri sobnoj temperaturi u odnosu na onu pri povišenoj temperaturi [33, 66]. Kao mjeru krutosti materijala uzima se modul elastičnosti koji predstavlja odnos naprezanja i deformacije i može se prikazati u krivulji naprezanje-deformacija kao nagib početnog dijela dijagrama. Mjera krutosti od iznimne je važnosti pri određivanju stabilnosti i sigurnosti konstrukcije. Važno je istaknuti da norme definiraju redukcijske faktore za materijalna svojstva materijala pri povišenim temperaturama, odnosno tijekom požara, ali ih ne sadržavaju iste i za svojstva nakon požara. Svi koeficijenti definirani Eurokodom i oni eksperimentalno određeni u literaturi iskazani su na slikama 17. i 18. [112]. Na slici 17. grafički su prikazani faktori redukcije modula elastičnosti tijekom požara, dobiveni ispitivanjem različitih legura izloženih povišenim temperaturama. Rezultati su uspoređeni s krivuljom koju predlaže Eurokod te su uočene razlike ponašanja pojedinih legura uz neminovnu redukciju modula elastičnosti, što implicira kontinuirani gubitak krutosti s porastom temperature.



Slika 17. Usporedba rezultata ispitivanja modula elastičnosti tijekom požara i Eurokoda 9 [112]

Na slici 18. prikazana je usporedba faktora redukcije nakon požara. Od iznimne je važnosti primjetiti da praktički nema većih redukcija, osim u primjeru legure 6082-T6, koja maksimalnu redukciju od 30 % postiže nakon izlaganja temperaturi od 500 °C. Prema rezultatima, omjeri ostaju gotovo konstantni, što bi značilo da modul elastičnosti nije pod utjecajem temperature nakon što se elementi ohlade.



Slika 18. Usporedba rezultata ispitivanja modula elastičnosti nakon požara [112]

Rezultati upućuju na mnogobrojne razlike među aluminijskim legurama pogodnima za konstruktivnu primjenu. Potrebna su daljnja ispitivanja da bi se popunili nedostaci normi za projektiranje aluminijskih konstrukcija. Kako bi se istražilo ključne parametre ponašanja u požaru, nužno je provesti numeričke analize koje bi reducirale broj potrebnih skupih i kompleksnih eksperimentalnih ispitivanja. Sukladno tome, javlja se motivacija za razvoj univerzalnog reološkog modela. Motivacija proizlazi iz potrebe integracije analiza aluminijskih konstrukcija u požaru, uzimajući u obzir sve složene i vremenski ovisne

komponente deformacija. Cilj je uzeti u obzir sve ključne termomehaničke varijable: temperaturu i prirast temperature, naprezanje i brzinu prirasta deformacija, koje čine glavne faktore ponašanja aluminija tijekom požara. Tako detaljnom i preciznom procjenom utjecaja požara na konstrukciju unaprijedilo bi se razumijevanje složenih procesa koji nastaju pod ekstremnim uvjetima.

4. Smjernice i ciljevi istraživanje

Zadnjih nekoliko desetljeća, posebno zadnjih nekoliko godina, aluminij se sve češće koristi u inženjerstvu. Kao najveća prednost istaknuta je njegova nosivost naspram vlastite težine uz izvrsnu otpornost na koroziju. Grade se aluminijski mostovi te je kao konstruktivni materijal sve više zastupljen na terenu i na *off-shore* konstrukcijama. Karakteristike koje aluminij nudi mogu uvelike sniziti troškove kontrole i održavanja. Zbog nedostatka informacija o nosivim konstruktivnim elementima od aluminijskih legura vršit će se analiza utjecaja puzanja na iste, posebno na stupove koji predstavljaju ključan element nosive konstrukcije s aspekta kolapsa. Radit će se na iznalaženju novih modela puzanja koji bi bili primjenjivi za aktualne legure aluminija odnosno poopćenom modelu za aluminijske legure koje se koriste u građevinarstvu.

Pregledom dosadašnjih studija utvrdila se posebna problematika požarne otpornosti aluminija pa se na nju stavlja posebna pozornost. Generalno, požarna otpornost nosive aluminijske konstrukcije treba se odrediti preko jednog ili više pristupa, a to su: jednostavni proračunski modeli, složeni napredniji proračunski modeli ili eksperimentalna ispitivanja. Da se reduciraju troškovi ispitivanja u budućnosti, sukladno eksperimentalnoj analizi ponašanja radit će se i na definiranju reološkog modela u cilju što učestalije primjene i potvrda do sada neispitanih legura.

4.1. Eksperimentalna ispitivanja na aluminiju

Aluminijske legure sve više su predmet istraživanja zbog njihove povećane upotrebe u građevinarstvu posljednjih desetljeća [34]. S obzirom na to da materijalna svojstva aluminijskih legura značajno opadaju u požaru posebno se ispituje aluminij izložen povišenim temperaturama [113]. Slijedom navedenog, svjesni da postoje svojevrсна ograničenja u vidu projektiranja s aluminijskim legurama, potrebno je provesti dodatna ispitivanja kako bi se dobila realna slika njihovih ponašanja pod različitim uvjetima, ali i mogućnosti primjene zaštite od požara. Metode vlačnog ispitivanja materijala i dijelova konstrukcije provodit će se prema ISO 6892.

Moguće je provoditi različite tipove ispitivanja ovisno o uvjetima i ciljanom ishodu. Stacionarnim testovima uzorci se izlažu određenoj brzini deformacije pri konstantnoj temperaturi, a mjeri se sila odnosno naprezanje. Nestacionarnim testovima uzorci se izlažu rastućoj temperaturi i određenom naprežanju tijekom vremena, a mjeri se deformacija. Pri određivanju puzanja uzorci se izlažu konstantnoj temperaturi i konstantnom naprežanju tijekom vremena, a mjeri se deformacija.

U sklopu Laboratorija za konstrukcije, Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, vlačno ispitivanje planira se provoditi Shimadzu AGX-V univerzalnim elektromotornim ispitnim strojem podnog tipa. S obzirom na karakteristična vlačna ispitivanja materijala, kolokvijalno se naziva i kidalica. Kidalica je kapaciteta 250 kN vlačne sile i 500

bara pritiska pridržanja uzorka. Dodatno je opremljena automatskim robotiziranim ekstenzometrom.



Slika 19. Univerzalni ispitni stroj Shimadzu AGX-V [114]

Uz kidalicu se planira koristiti peć za zagrijavanje uzoraka SF2297C koja može razviti temperaturu do 1200°C odnosno izvršiti zagrijavanje uzorka do 1000°C. Maksimalna brzina zagrijavanja kreće se u rasponu od 10 do 20 °C. Uz nju će se koristiti pripadajući ekstenzometar sa zaštitama i ugrađeni termoparovi tipa N za kontrolu temperature uzorka i same peći.



Slika 20. Električna peć SF2297F [115]

4.2. Razvoj novog modela

Od iznimne je važnosti imati mogućnost što točnije procjene opsega oštećenja i statusa materijalnih karakteristika odnosno mehaničkih svojstava aluminija tijekom i nakon izlaganja požarnom opterećenju. Procjene mogu pomoći u donošenju odluke o tome što s konstrukcijom – potpuno je demontirati, izvršiti potrebne sanacije ili ponovno početi s uporabom.

Kako bi se izvršila takva procjena konstrukcije odnosno procjena deformacije elementa, po uzoru na model čelika kojeg su izradili Torić et al. [110] pogodan za stacionarna i nestacionarna ispitivanja na čeliku verificiran mnogim eksperimentalno dobivenim podacima na S275 i S355 uz mogućnost prilagodbe različitim klasama i vrstama čelika, potrebno je razviti model adekvatan aluminijskim legurama.

Provodit će se laboratorijska istraživanja i analize svojstava aluminijskih legura tijekom i nakon izlaganja povišenim temperaturama koja će biti osnova za izradu modela procjene. Inicijalno je potrebno provesti laboratorijska ispitivanja na sobnoj temperaturi te pri povišenim temperaturama. Eksperimentalno dobivene vrijednosti materijalnih karakteristika uz izloženosti požarnom opterećenju trebaju bit će detaljno analizirane i uspoređene s pripadajućim karakteristikama na sobnoj temperaturi.

Na temelju niza usporedbi i detaljne analize, predložit će se predikcijski model za leguru 6060-T66 odnosno poopćeni model za aluminijske legure koji bi trebao omogućiti točno predviđanje požarnih i post-požarnih materijalnih svojstava.

Na taj način izbjeglo bi se velike troškove eksperimentalnih ispitivanja u budućnosti koja bi provjeravala pojedine aluminijske legure odnosno ponašanja konstrukcije koja je od iste izgrađena.

Sasso et al. [116] ispitali su razlike na istoj vrsti aluminijske legure u različitom stanju, T6 i O, te pri tom ukazali na značajne varijacije duktilnog ponašanja i loma ovisno o toplinskoj obradi. Stoga je unatoč sličnom sastavu legura koje će biti uzete u obzir, potrebno modelu pristupiti s oprezom i provesti brojne dodatne validacije eksperimentalno dobivenim vrijednostima.

Tablica 4. Eksperimentalno određeni kemijski sastavi legura

Legura	Al	Cu	Si	Fe	Mg	Mn	Zn	Cr	Ti
6082-T6 [16]	96.49	0.099	1.281	0.708	0.767	0.523	0.0615	0.0141	0.0108
6060-T66 [33]	98.92	0.0038	0.4463	0.1649	0.4135	0.0006	0.0055	0.0024	0.003

*u leguri 6082-T6 pronađeni su Ca, Pb i Sn, a u leguri 6060-T66 je pronađen maleni udio Ni;

Literatura

- [1] Aboulkhair, N. T., Simonelli, M., Parry, L., Ashcroft, I., Tuck, C., Hague, R.: 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting, *Progress in Materials Science*, 106 (2018), doi: [10.1016/j.pmatsci.2019.100578](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578)
- [2] Aluminium-The Green Metal, 2012. Hazlemere, <https://www.hazlemerecommercial.co.uk/blog/aluminium-the-green-metal/2012/04/>, 18.7.2025.
- [3] Environmental Footprint of Semi-Fabricated Aluminum Products in North America Life Cycle Assessment, 2022. The Aluminum Association, <https://www.aluminum.org/sustainability>, 18.7.2025.
- [4] The Crystal by Wilkinson Eyre, 2013. OnOffice magazine, <https://www.onofficemagazine.com/architecture/the-crystal-by-wilkinson-eyre>, 18.7.2025.
- [5] From Rare Metal to Building Staple: The Story of Aluminum in Construction, 2023. Alunaut Industries LinkedIn, <https://www.linkedin.com/pulse/from-rare-metal-building-staple-story>, 18.7.2025.
- [6] The History of Aluminium, 2020. Stellar aluminium systems, <https://stellaraluminium.co.uk/Blog/the-history-of-aluminium/>, 18.7.2025.
- [7] Famous aluminium structures, 2021. Lasered Components Ltd, Essex., <https://lasered.co.uk/news/famous-aluminium-structure/>, 18.7.2025.
- [8] Ferrari World in Abu Dhabi: the largest Aluminium roof in the world, 2016. Metal Working World Magazine, <https://www.metalworkingworldmagazine.com/abu-dhabis-ferrari-world-is-the-largest-aluminium-roof-in-the-world/>, 18.7.2025.
- [9] Impressive Aluminium Structures from Around the World, 2019. Paragone, <https://pgceilings.co.za/impressive-aluminium-structures-from-around-the-world/>, 18.7.2025.
- [10] Arvida Aluminium Bridge, Canadian Society for Civil Engineering, <https://legacy.csce.ca/en/historic-site/arvida-aluminium-bridge/>, 18.7.2025.
- [11] Structurae - Structures: Aluminium bridges, <https://structurae.net/en/structures/bridges/aluminum-bridges>, 18.7.2025.
- [12] Wen, Q., Qi, Y.: Research on design of aluminum truss bridge, *Advanced Materials Research*, 168-170 (2011), pp. 1776–1779. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.1776](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.1776)
- [13] Longest Canadian Aluminum Pony-Truss Bridge in Brossard, 2012. MAADI group, <https://maadigroup.com/news/longest-canadian-aluminum-pony-truss-bridge-in-brossard/>, 18.7.2025.
- [14] Global Growth Insights - Aluminium for construction market, <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/aluminum-for-construction-market-104707>, 18.7.2025.

- [15] 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]
- [16] Torić, N., Brnić, J., Boko, I., Brčić, M., Burgess, I. W., Uzelac, I.: Experimental analysis of the behaviour of aluminium alloy EN 6082AW T6 at high temperature, *Metals*, 7 (2017) 4, doi: [10.3390/met7040126](https://doi.org/10.3390/met7040126)
- [17] Formisano, A., de Matteis, G., Mazzolani, F. M.: Experimental and numerical researches on aluminium alloy systems for structural applications in civil engineering fields, *Key Engineering Materials*, 710 (2016), pp. 256–261. doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.710.256](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.710.256)
- [18] Deadly Hotel Fire at Turkish Ski Resort, 2025., The New York Times, <https://www.nytimes.com/2025/01/22/world/middleeast/turkey-ski-resort-fire-families-grief.html>, 18.7.2025.
- [19] What led to hotel fire disaster at Turkish ski resort?, 2025., BBC, <https://www.bbc.com/news/articles/cp82yk6x3eko>, 18.7.2025.
- [20] EN 1999-1-2 (2007) (English): Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
- [21] Peroš, B., Boko, I.: *Sigurnost konstrukcija u požaru*, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2014.
- [22] Boko, I., Skejić, D., Torić, N.: *Aluminijske konstrukcije*, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2017.
- [23] Boko, I., Skejić, D., Torić, N., Čolić, A.: An optimum selection of alloy for aluminium structures exposed to fire, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 8, pp. 225–235, doi: [10.14256/JCE.2853.2019](https://doi.org/10.14256/JCE.2853.2019)
- [24] The Aluminum Association. Aluminum design manual. Washington, D.C.; 2020.
- [25] Australian/New Zealand Standard (AS/NZS) Aluminium structures part 1: Limit state design. AS/NZS 1664.1:1997. Standards Australia, Sydney, Australia; 1997.
- [26] GB 50429-2007. Code for design of aluminium structures. Ministry of Construction of the People's Republic of China
- [27] Dokšanović, T., Džeba, I., Markulak, D.: Variability of structural aluminium alloys mechanical properties, *Structural Safety*, 67 (2017), pp. 11–26, doi: [10.1016/j.strusafe.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.03.004)
- [28] Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., Pisapia, A.: Ultimate behaviour of aluminium alloy I-beams: New experimental tests and European codification, *Thin-Walled Structures*, 191 (2023), doi: [10.1016/j.tws.2023.111038](https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111038)
- [29] EN 1993-1-2 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

- [30] Toric, N., Sun, R. R., Burgess, I. W.: Creep-free fire analysis of steel structures with Eurocode 3 material model, *Journal of Structural Fire Engineering*, 7 (2016) 3, pp. 234–248, doi: [10.1108/JSFE-09-2016-016](https://doi.org/10.1108/JSFE-09-2016-016)
- [31] Ramberg, W., Osgood, W.R.: Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Washington, 1942. Technical Note No. 902.
- [32] Gardner, L., Ashraf, M.: Structural design for non-linear metallic materials, *Engineering Structures*, 28 (2006) 6, pp. 926–934, doi: [10.1016/j.engstruct.2005.11.001](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.11.001)
- [33] 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*, 39 A (2008) 4, pp. 778–789, doi: [10.1007/s11661-008-9470-0](https://doi.org/10.1007/s11661-008-9470-0)
- [34] Georgantzia, E., Gkantou, M., Kamaris, G. S.: Aluminium alloys as structural material: A review of research, *Engineering Structures*, 227 (2021), doi: [10.1016/j.engstruct.2020.111372](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372)
- [35] Chen, Y., Clausen, A. H., Hopperstad, O. S., Langseth, M.: Stress-strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates, *International Journal of Solids and Structures*, 46 (2009) 21, pp. 3825–3835, doi: [10.1016/j.ijsolstr.2009.07.013](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.07.013)
- [36] Guo, X., Wang, L., Shen, Z., Zou, J., Liu, L.: Constitutive model of structural aluminum alloy under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 180 (2018), pp. 643–654, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.05.291](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.291)
- [37] Benedetti, M., Menapace, C., Fontanari, V., Santus, C.: On the variability in static and cyclic mechanical properties of extruded 7075-T6 aluminum alloy, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 44 (2021) 11, pp. 2975–2989, doi: [10.1111/ffe.13530](https://doi.org/10.1111/ffe.13530)
- [38] Guo, X., Xiong, Z., Shen, Z.: Flexural-torsional buckling behavior of aluminum alloy beams, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 9 (2015) 2, pp. 163–175, doi: [10.1007/s11709-014-0272-8](https://doi.org/10.1007/s11709-014-0272-8)
- [39] Feng, R., Sun, W., Shen, C., Zhu, J.: Experimental investigation of aluminum square and rectangular beams with circular perforations, *Engineering Structures*, 151 (2017), pp. 613–632, doi: [10.1016/j.engstruct.2017.08.053](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.053)
- [40] Landolfo, R., Mazzolani, F. M.: Different Approaches in the Design of Slender Aluminium Alloy Sections, *Thin-Walled Structures*, 27 (1997) 1, pp. 805–102
- [41] Hopperstad, O.S., Langseth, M., Hanssen, L.: Ultimate Compressive Strength of Plate Elements in Aluminium: Correlation of Finite Element Analyses and Tests, *Thin-Walled Structures*, 29 (1997) 1-4, pp. 31–46
- [42] Langseth, M., Hopperstad, O.S.: Local Buckling of Square Thin-Walled Aluminium Extrusions, *Thin-Walled Structures*, 27 (1997) 1, pp. 117–126
- [43] Hopperstad, O.S., Langseth, M., Tryland, T.: Ultimate strength of aluminium alloy outstands in compression: experiments and simplified analysis, *Thin-Walled Structures*, 34 (1999), pp. 279–294

- [44] Faella, C., Mazzolani, F. M., Piluso, V., Rizzano, G.: LOCAL BUCKLING OF ALUMINUM MEMBERS: TESTING AND CLASSIFICATION, *Journal of Structural Engineering*, 126 (2000), pp. 353-360
- [45] Zhu, J.-H., Young, B.: Tests and Design of Aluminum Alloy Compression Members, *Journal of Structural Engineering*, 132 (2006) 7, pp. 1096–1107, doi: [10.1061/\(asce\)0733-9445\(2006\)132:7\(1096\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:7(1096))
- [46] Zhu, J. H., Young, B.: Aluminum alloy circular hollow section beam-columns, *Thin-Walled Structures*, 44 (2006) 2, pp. 131–140, doi: [10.1016/j.tws.2006.02.006](https://doi.org/10.1016/j.tws.2006.02.006)
- [47] Zhu, J.-H., Young, B., Asce, M.: Experimental Investigation of Aluminum Alloy Thin-Walled Tubular Members in Combined Compression and Bending, *Journal of Structural Engineering*, 132 (2006), pp. 1955-1966, doi: [10.1061/ASCE0733-94452006132:121955](https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94452006132:121955)
- [48] Rønning, L., Aalberg, A., Kristian Larsen, P.: An experimental study of ultimate compressive strength of transversely stiffened aluminium panels, *Thin-Walled Structures*, 48 (2010) 6, pp. 357–372, doi: [10.1016/j.tws.2010.01.015](https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.01.015)
- [49] Mazzolani, F. M., Piluso, V., Rizzano, G.: Local Buckling of Aluminum Alloy Angles under Uniform Compression, *Journal of Structural Engineering*, 137 (2011) 2, pp. 173-184, doi: [10.1061/ASCEST.1943-541X.0000289](https://doi.org/10.1061/ASCEST.1943-541X.0000289)
- [50] Su, M.N., Young, B., Asce, M., Gardner, L.: Testing and Design of Aluminum Alloy Cross Sections in Compression, *Journal of Structural Engineering*, 140 (2014) 7, doi: [10.1061/\(ASCE\)ST](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST)
- [51] Yuan, H. X., Wang, Y. Q., Chang, T., Du, X. X., Bu, Y. D., Shi, Y. J.: Local buckling and postbuckling strength of extruded aluminium alloy stub columns with slender I-sections, *Thin-Walled Structures*, 90 (2015), pp. 140–149, doi: [10.1016/j.tws.2015.01.013](https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.01.013)
- [52] Zhao, Y., Zhai, X., Sun, L.: Test and design method for the buckling behaviors of 6082-T6 aluminum alloy columns with box-type and L-type sections under eccentric compression, *Thin-Walled Structures*, 100 (2016), pp. 62–80, doi: [10.1016/j.tws.2015.12.010](https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.010)
- [53] Wang, Y. Q., Yuan, H. X., Chang, T., Du, X. X., Yu, M.: Compressive buckling strength of extruded aluminium alloy I-section columns with fixed-pinned end conditions, *Thin-Walled Structures*, 119 (2017), pp. 396–403, doi: [10.1016/j.tws.2017.06.034](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.06.034)
- [54] Zhao, Y., Zhai, X., Wang, J.: Buckling behaviors and ultimate strengths of 6082-T6 aluminum alloy columns under eccentric compression – Part I: Experiments and finite element modelling, *Thin-Walled Structures*, 143 (2019), doi: [10.1016/j.tws.2019.106207](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106207)
- [55] Zhang, Y., Bu, Y., Wang, Y., Wang, Z., Ouyang, Y.: Study of flexural–torsional buckling behaviour of 6061-T6 aluminium alloy unequal-leg angle columns, *Thin-Walled Structures*, 164 (2021), doi: [10.1016/j.tws.2021.107821](https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107821)
- [56] Wang, Z., Wang, Y., Yun, X., Gardner, L., Hu, X.: Experimental and Numerical Study of Fixed-Ended High-Strength Aluminum Alloy Angle-Section Columns, *Journal of Structural Engineering*, 146 (2020) 10, doi: [10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002773](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002773)

- [57] Rouholamin, M., Gunalan, S., Poologanathan, K., Karampour, H.: Experimental study of roll-formed aluminium lipped channel beams in shear, *Thin-Walled Structures*, 153 (2020), doi: [10.1016/j.tws.2020.106687](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106687)
- [58] Yuan, L., Zhang, Q., Luo, X., Ouyang, Y., Yin, J.: Shear resistance of aluminum alloy extruded H-Section beams, *Thin-Walled Structures*, 159 (2021), doi: [10.1016/j.tws.2020.107219](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107219)
- [59] Su, M. N., Young, B.: Material properties of normal and high strength aluminium alloys at elevated temperatures, *Thin-Walled Structures*, 137 (2019), pp. 463–471, doi: [10.1016/j.tws.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.012)
- [60] Liu, Y., Liu, H., Chen, Z.: Post-fire mechanical properties of aluminum alloy 6082-T6, *Construction and Building Materials*, 196 (2019), pp. 256–266, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.10.237](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.237)
- [61] Guo, X., Tao, L., Zhu, S., Zong, S.: Experimental Investigation of Mechanical Properties of Aluminum Alloy at High and Low Temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (2020) 2, doi: [10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003002](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003002)
- [62] Sun, Y., Zhang, K., Gong, G.: Material properties of structural aluminium alloys after exposure to fire, *Structures*, 55 (2023), pp. 2105–2111, doi: [10.1016/j.istruc.2023.07.027](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.07.027)
- [63] Djapic Oosterkamp, L., Ivankovic, A., Venizelos, G.: High strain rate properties of selected aluminium alloys, *Materials Science and Engineering*, 278 (2000), pp. 225–235
- [64] Maljaars, J., Soetens, F., Snijder, H. H.: Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 1: Tests, *Thin-Walled Structures*, 47 (2009) 11, pp. 1404–1417, doi: [10.1016/j.tws.2009.02.008](https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.02.008)
- [65] Jiang, S., Xiong, Z., Guo, X., He, Z.: Buckling behaviour of aluminium alloy columns under fire conditions, *Thin-Walled Structures*, 124 (2018), pp. 523–537, doi: [10.1016/j.tws.2017.12.035](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.035)
- [66] 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 (2023) 7, doi: [10.1061/jsendh.steng-12383](https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-12383)
- [67] Chapman, J. C., Erickson, B., Hoff, N. J.: *A THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CREEP BUCKLING*, *Int. J. Mech. Sci.*, 1 (1960), pp. 145–174
- [68] Kaufman, J. G.: *Properties of Aluminum Alloys: Tensile, Creep, and Fatigue Data at High and Low Temperatures*, The Aluminium Association, 1999.
- [69] Shivakumar, S. P., Sharan, A. S., Sadashivappa, K.: Constitutive modeling of creep properties of Aluminum 6061 Alloy, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 310 (2018) , doi: [10.1088/1757-899X/310/1/012027](https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012027)
- [70] Zhao, P., Shen, J., Zhang, H.: Short-term creep behavior in P91 heat-resistant steel at low stress, *Materials Science Forum*, 850 (2016), pp. 922–926, doi: [10.4028/www.scientific.net/MSF.850.922](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.850.922)

- [71] Kumar, S., Ramteke, S., Chelika, S., Vanitha, C.: Creep behavior of Al-Si-Mg alloy by hot impression creep test, *Materials Today: Proceedings*, 41 (2019), pp. 1207–1211, doi: [10.1016/j.matpr.2020.10.348](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.348)
- [72] Piluso, V., Pisapia, A., Nastri, E., Montuori, R.: Ultimate resistance and rotation capacity of low yielding high hardening aluminium alloy beams under non-uniform bending, *Thin-Walled Structures*, 135 (2019), pp. 123–136, doi: [10.1016/j.tws.2018.11.006](https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.11.006)
- [73] Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., Pisapia, A.: Ultimate behaviour of high-yielding low-hardening aluminium alloy I-beams, *Thin-Walled Structures*, 146 (2020), doi: [10.1016/j.tws.2019.106463](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106463)
- [74] Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., Pisapia, A.: The Influence of the Material Properties on the Ultimate Behaviour of Aluminium H-shaped Beams, *The Open Construction & Building Technology Journal*, 15 (2021) 1, pp. 176–188, doi: [10.2174/1874836802115010176](https://doi.org/10.2174/1874836802115010176)
- [75] Piluso, V., Pisapia, A.: Interactive Plastic Local Buckling of Box-shaped Aluminium Members under Uniform Compression, *Thin-Walled Structures*, 164 (2021), doi: [10.1016/j.tws.2021.107828](https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107828)
- [76] Maljaars, L., Twilt, L., Fellinger, J. H. H., Snijder H. H., Soetens, F.: Aluminium structures exposed to fire conditions-an overview, *Heron*, 55 (2010) 2, pp. 85-122
- [77] Metallic materials -- Tensile testing -- Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2019; EN ISO 6892-1:2019)
- [78] You, X., Xing, Z., Jiang, S., Zhu, Y., Lin, Y., Qiu, H., Nie, R., Yang, J., Hui, D., Chen, W., Chen, Y.: A review of research on aluminum alloy materials in structural engineering, *Developments in the Built Environment*, 17 (2024), doi: [10.1016/j.dibe.2023.100319](https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100319)
- [79] Tabrizian, N., Hansen, H. N., Hansen, P. E., Ambat, R., Møller, P.: Influence of annealing and deformation on optical properties of ultra precision diamond turned and anodized 6060 aluminium alloy, *Surface and Coatings Technology*, 204 (2010) 16–17, pp. 2632–2638, doi: [10.1016/j.surfcoat.2010.02.002](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.02.002)
- [80] Sathishkumar, N., Gavaskar, T., Dhanasakkaravarthi, B., Ramakrishnan, T., Rathinasabapathi, G.: Study on the influence of heat treatment process on machinability behaviour of aluminium alloy 6060, *Materials Today: Proceedings*, 66 (2022), pp. 1477–1484, doi: [10.1016/j.matpr.2022.05.583](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.583)
- [81] Fröck, H., Kappis, L. V., Reich, M., Kessler, O.: A phenomenological mechanical material model for precipitation hardening aluminium alloys, *Metals*, 9 (2019) 11, doi: [10.3390/met9111165](https://doi.org/10.3390/met9111165)
- [82] Chybiński, M., Polus, Ł., Ratajczak, M., Sielicki, P. W.: The evaluation of the fracture surface in the aw-6060 t6 aluminium alloy under a wide range of loads, *Metals*, 9 (2019) 3, doi: [10.3390/met9030324](https://doi.org/10.3390/met9030324)
- [83] Mimica, R., Radošević, J., Slavica-Matešić, S.: Elektrokemijska svojstva aluminijске slitine EN AW 6060, *Strojarstvo*, 53 (2011) 4, pp. 271-275

- [84] Krüger, L., Schwarz, F., Mandel, M., Hockauf, M.: Electrochemical corrosion studies of ultrafine-grained aluminium alloy en AW-6063, *Materials and Corrosion*, 66 (2015) 3, pp. 226–232, doi: [10.1002/maco.201307349](https://doi.org/10.1002/maco.201307349)
- [85] Harmathy, T.Z.: A comprehensive creep model, *Journal of Basic Engineering*, 89 (1967) 3, pp. 496–502, doi: [10.4224/40001531](https://doi.org/10.4224/40001531)
- [86] Harmathy, T.Z.: Creep deflection of metal beams in transient heating processes, with particular reference to fire, *CANADIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING*, 3 (1976) 2, pp. 219–228, doi: [10.4224/40001668](https://doi.org/10.4224/40001668)
- [87] Dorn, J. E.: SOME FUNDAMENTAL EXPERIMENTS ON HIGH TEMPERATURE CREEP, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8 (1954), pp. 85–116
- [88] 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), pp. 151–156
- [89] Maljaars, J., Soetens, F., Snijder, H. H.: Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 2: Finite element models, *Thin-Walled Structures*, 47 (2009) 11, pp. 1418–1428, doi: [10.1016/j.tws.2008.06.003](https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.06.003)
- [90] Soyal, Z.: *Creep of aluminum alloys exposed to fire conditions*, Master thesis, University of technology Eindhoven, 2016.
- [91] 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 (2010) 4–5, pp. 1185–1193, doi: [10.1016/j.msea.2009.10.010](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.10.010)
- [92] 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), pp. 155–162, doi: [10.1016/j.engstruct.2011.09.014](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.014)
- [93] 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 (2018) 8, pp. 879–888, doi: [10.1002/fam.2643](https://doi.org/10.1002/fam.2643)
- [94] Zheng, Y. Q., Zhang, Z.: The fire performance and fire-resistance design of aluminium alloy I-beams, *Fire and Materials*, 40 (2016) 1, pp. 141–157, doi: [10.1002/fam.2275](https://doi.org/10.1002/fam.2275)
- [95] 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 (2024) 3, pp. 1324–1332, doi: [10.1007/s11668-024-01917-7](https://doi.org/10.1007/s11668-024-01917-7)
- [96] 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), pp. 333–353, doi: [10.1016/j.jmrt.2023.05.183](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.183)
- [97] Spigarelli, S. *Creep of aluminum and aluminium alloys*, TALAT Lecture 1253, European Aluminium Association, Italy, 1999.
- [98] Mahathaninwong, N., Zhou, Y., Babcock, S.E., Plookphol, T., Wannasin, J., Wisutmethangoon, S.: Creep rupture behavior of semi-solid cast 7075-T6 Al alloy,

- Materials Science and Engineering: A*, 556 (2012), pp. 107-113, doi: [10.1016/j.msea.2012.06.064](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.064)
- [99] Thongkam, S., Wisutmethangoon, S., Wannasin, J., Chantaramanee, S., Plookphol, T.: Creep of rheocast 7075 aluminum alloy at 300 °C, *Applied Mechanics and Materials*, 372 (2013), pp. 288–291, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.372.288](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.372.288)
- [100] Wu, J.F., He, D.G., Lin, Y.C., Chen, Z.J., Ding, H.B., Qiu, Y.L.: A unified constitutive model and microstructure evolution of a solution treated 7075 aluminum alloys under warm forming condition, *Journal of Materials Research and Technology*, 30 (2024), pp. 4159-4168, doi: [10.1016/j.jmrt.2024.04.101](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.101)
- [101] Omer, K., Butcher, C., Worswick, M.: Characterization and Application of a Constitutive Model for two 7000-Series Aluminum Alloys Subjected to Hot Forming, *International Journal of Mechanical Sciences*, 165 (2020), doi: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105218](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105218)
- [102] Lin, Y.C., Jiang, Y.Q., Zhou, H.M., Liu G.: A new creep constitutive model for 7075 aluminum alloy under elevated temperatures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 (2014) 12, pp. 4350-4357, doi: [10.1007/s11665-014-1191-5](https://doi.org/10.1007/s11665-014-1191-5)
- [103] 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)
- [104] Yun, X., Wang, Z., Gardner, L.: Full-Range Stress–Strain Curves for Aluminum Alloys, *Journal of Structural Engineering*, 147 (2021) 6, doi: [10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002999](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002999)
- [105] Nabarro, F. R. N.: Creep in commercially pure metals, *Acta Materialia*, 54 (2006) 2, pp. 263–295, doi: [10.1016/j.actamat.2005.08.021](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.08.021)
- [106] Spigarelli, S., Sandström, R.: Basic creep modelling of aluminium, *Materials Science and Engineering: A* 711 (2018), pp. 343–349, doi: [10.1016/j.msea.2017.11.053](https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.053)
- [107] Anderberg, Y.: Modelling steel behavior, *Fire Safety Journal*, 13 (1988) 1, pp. 17-26, doi: [10.1016/0379-7112\(88\)90029-X](https://doi.org/10.1016/0379-7112(88)90029-X)
- [108] Helman, H., Creus, G. J.: A NON-LINEAR RHEOLOGICAL MODEL DESCRIBING TIME-DEPENDENT DEFORMATIONS AND FAILURE, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 10 (1975), pp. 167-172, doi: [10.1016/0020-7462\(75\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0020-7462(75)90034-7)
- [109] 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), pp. 54–61, doi: [10.1016/j.msea.2012.08.152](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.152)
- [110] Torić, N., Burgess, I. W.: A unified rheological model for modelling steel behaviour in fire conditions, *Journal of Constructional Steel Research*, 127 (2016), pp. 221–230., doi: [10.1016/j.jcsr.2016.07.031](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.031)
- [111] Torić, N., Burgess, I.: Rheological modelling of high-temperature stationary creep tests of Grade S275JR steel, *ce/papers*, 4 (2021), Nos. 2 - 4, doi: [10.1002/cepa](https://doi.org/10.1002/cepa)
- [112] Bendić, D., Torić, N., Boko, I.: The constitutive behaviour of aluminium alloys at high temperatures, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 8, pp. 777-790, doi: [10.14256/JCE.4308.2025](https://doi.org/10.14256/JCE.4308.2025)

**KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT
DOMAGOJ BENDIĆ, STUDENI 2025.**

- [113] Wang, Z., Li, M., Han, Q., Yun, X., Zhou, K., Gardner, L., Mazzolani, F.M.: Structural fire behaviour of aluminium alloy structures: Review and outlook, *Engineering Structures*, 268 (2022), doi: [10.1016/j.engstruct.2022.114746](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114746)
- [114] Specijalizirana laboratorijska jedinica - Laboratorij za konstrukcije, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, <https://gradst.unist.hr/istrazivanje/laboratorij-fgag/laboratorij-za-konstrukcije>, 18.7.2025.
- [115] Split Furnace Range, Severn thermal solutions, <https://www.severnts.co.uk/products/split-furnace-2/>, 18.7.2025.
- [116] Sasso, M., Forcellese, A., Simoncini, M. , Amodio, D., Mancini, E.: High strain rate behaviour of AA7075 aluminum alloy at different initial temper states, *Key Engineering Materials*, 651-653 (2015), pp. 114–119., doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.114](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.114)