

Primljen / Received: 16.4.2025.

Ispravljen / Corrected: 24.6.2025.

Prihvaćen / Accepted: 2.7.2025.

Dostupno online / Available online: 10.9.2025.

Konstitutivno ponašanje aluminijskih legura pri visokim temperaturama

Autori:



Domagoj Bendić, mag.ing.aedif.

Sveučilište Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

domagoj.bendic@gradst.hr

Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Neno Torić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

neno.toric@gradst.hr



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

Sveučilište Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

ivica.boko@gradst.hr

Pregledni rad

Domagoj Bendić, Neno Torić, Ivica Boko

Konstitutivno ponašanje aluminijskih legura pri visokim temperaturama

U radu dan je pregled istraživanja aluminijskih legura kao konstruktivnih elemenata s težištem na pozitivnim svojstvima i potencijalnim primjenama, ali i na određenim slabostima, osobito tijekom požara. Posebno su obrađeni radovi, pod cijelim spektrom uvjeta ispitivanja aluminijskih legura, o mehaničkim svojstvima i vremenski ovisnim deformacijama. Naposljetku je dan osvrt na potencijalne reološke modele koji bi bili prikladni za naprednija istraživanja ponašanja aluminija pri visokim temperaturama.

Ključne riječi:

aluminij, aluminijske legure, požar, mehanička svojstva, puzanje

Subject review

Domagoj Bendić, Neno Torić, Ivica Boko

The constitutive behaviour of aluminium alloys at high temperatures

The paper presents a review of research on aluminium alloys as structural elements, highlighting their positive characteristics and potential applications, as well as certain weaknesses – especially during fire. Papers examining the mechanical properties and time-dependent deformations under different temperature testing conditions are particularly discussed. This paper also provides an overview of potential rheological models that could be suitable for advanced research on the behaviour of aluminium at elevated temperatures.

Key words:

aluminium, aluminium alloys, fire, mechanical properties, creep

1. Uvod

1.1. Aluminij kao materijal

Unatoč činjenici da 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. Zbog neadekvatnih mehaničkih svojstava u čistome obliku razvoj odgovarajućih aluminijskih legura bio je neophodan za njegovu primjenu u nosivim konstrukcijama. Ovisno o legirnome elementu postižu se različite legure, odnosno skupine 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 počele su se primjenjivati u nosivim konstrukcijama, a danas aluminij uz čelik čini najvažniji metal za primjenu u nosivim konstrukcijama u građevinarstvu. Zbog svojih karakterističnih svojstava u posljednjih nekoliko desetljeća aluminijske legure sve su češće u uporabi u građevinskoj industriji. Za razliku od čelika, aluminij nije feromagnetičan, ne hrđa te se može koristiti bez boja i premaza. Jedna od razlika koja ga čini vrlo povoljnim za korištenje jest 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 krtome lomu pri niskim temperaturama kao što je to slučaj s čelikom. S obzirom na to da je estetski atraktivnog izgleda te da ne zahtijeva dodatnu zaštitu premazima, vrlo je popularan i u nenosivim fasadnim sustavima. Dodatna prednost aluminija je i napredak proizvodnih procesa te mogućnost potpunog recikliranja aluminijskih legura pogodnih za konstruktivnu namjenu, što ga čini vrlo održivim [1].

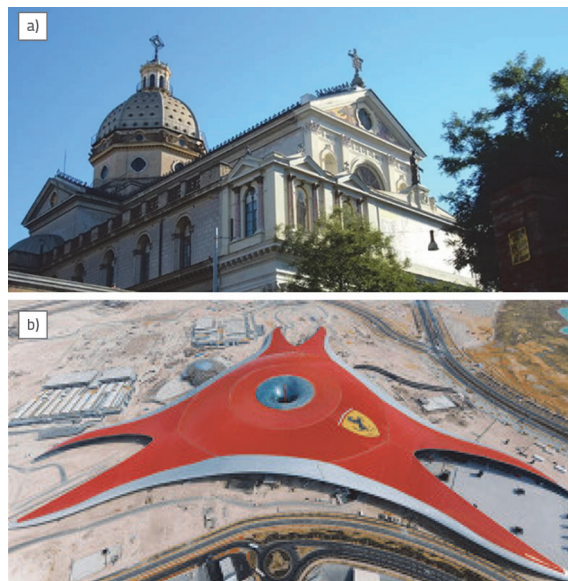


Slika 1. The Crystal, London – krov izrađen od 100 % recikliranog aluminija [4]

Prema podacima Vijeća za aluminij u gradnji, godine 2008. 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]. Važno je istaknuti da se osnovna svojstva aluminija ne mijenjaju tijekom reciklaže. Sama proizvodnja izuzetno je poboljšana u odnosu

na kraj 20. stoljeća, čime su u proizvodnji aluminijskih legura zahtjevi za potrošnjom energije smanjeni za više od 75 %, što je dovelo do smanjenja emisija stakleničkih plinova (ugljičnog otiska) za gotovo 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.

Jedna od prvih primjena aluminija zabilježena je na Washingtonovu spomeniku u Washingtonu, u Sjedinjenim Američkim Državama, 1884. Ukupna količina toga tada vrlo rijetkog i skupog materijala upotrijebljena je za izradu vrha stupa i iznosila je nešto manje od 3 kilograma [5]. U dvadesetim godina 20. stoljeća elektrolizom su troškovi proizvodnje aluminija smanjeni za 80 % te se počeo konkretnije primjenjivati. Osnovni nosivi dijelovi zgrade, kao i interijer Empire State Buildinga, izgrađenog 1931., 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, površine od 200.000 m² (slika 2.b) [8].



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



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



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



Slika 5. Aluminijски pješački most, Brossard, Kanada [12]

S obzirom na malu težinu i otpornost na koroziju, u građevinarstvu se aluminijске legure najčešće primjenjuju na konstrukcije 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 fasadu, za koju je aluminij bio idealan izbor zbog zahtijevanih oblika i s obzirom na visok udio soli i vlage. Konstruktivni su elementi betonski [9]. Most Arvida (slika 4.) u Kanadi iz 1950. prvi je most na svijetu izgrađen u cijelosti od aluminija. Ukupna masa mosta iznosi 163 tone, što je manje od polovice mase istovjetnog mosta izgrađenog od čelika [10]. Još uvijek nosi titulu aluminijskog mosta s najvećim glavnim rasponom od 91,5 m, a slijede ga pješački mostovi glavnih raspona 50 do 65 m [11]. Na slici 5. prikazan je aluminijски pješački most u Kanadi, raspona 44 m, montiran iz triju segmenata u samo jednome danu. Prema trenutanim podacima, građevinska industrija u svijetu koristi 25 % globalne proizvodnje aluminija [13]. Aluminijске se legure općenito klasificiraju u dvije skupine: gnječive (kovke) legure koje se tope u peći, a potom oblikuju izlivanjem u kalupe, i lijevane legure koje se primarno obrađuju u čvrstome stanju. Finalni oblik gnječivih legura postiže se raznim postupcima valjanja, kovanja, istiskivanja i sličnog. Klasifikacija ovisi o mogućnosti toplinske obrade, osobito za serije koje

moгу podlijegati 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 proizišle iz izvorne legure. Zadnje dvije znamenke isključivo su nomenklaturnoga karaktera. Prednostima korištenja aluminijских legura u području građevinarstva bave se Formisano et al. [14], ističući visok potencijal primjene tog materijala u obliku ekstrudiranja složenijih oblika, ponašanje spojeva i uređaja za seizmičku zaštitu okvirnih čeličnih konstrukcija. U ovome radu obratit će se pozornost ponajviše na gnječive aluminijске legure s glavnim legirnim elementima magnezija i silicija, brojčane oznake EN AW 6xxx odnosno kemijskog simbola AlMgSi. Uloga je magnezija poboljšanje korozijske otpornosti i otpornosti u alkalnim otopinama. To su najčešće korištene legure, dobro se zavaruju i oblikuju 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]. Svojstva i ponašanje legure 6082-T6 detaljno su ispitani na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu. (Torčić et al. [16]). Ispitivanjem su odredili svojstva aluminija naspram čelika te na taj način otvorili vrata njegovoj učestalijoj upotrebi u građevinarstvu. S obzirom na potrebe daljnjih istraživanja, posebna pozornost dat će se leguri 6060-T66. Riječ je o izvornoj leguri iz serije 6xxx, rastvorno žarenoj i umjetno dozrijevanoj, koja kroz kontrolu propisanog postupka ostvaruje bolja mehanička svojstva u odnosu na istu leguru tempera T6.

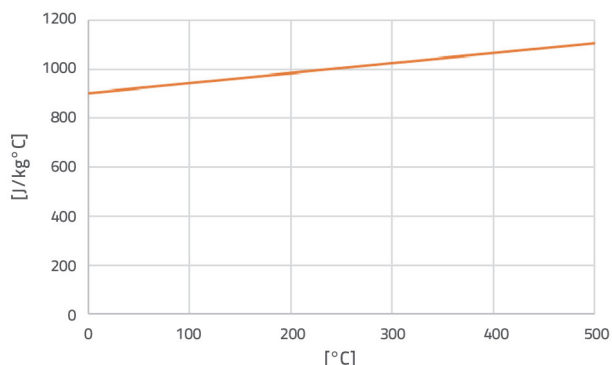
Tablica 1. Usporedba mehaničkih svojstava čelika i aluminija pri sobnoj temperaturi

Mehanička svojstva pri sobnoj temperaturi	Čelik (EN 1993-1-1)			Aluminij (EN 1999-1-1)	
	S235	S275	S355	6060 T66	6082 T6
Gustoća [kg/m³]	≈ 7850			≈ 2700	
Jednična težina [kN/m³]	≈ 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/mm²]	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	

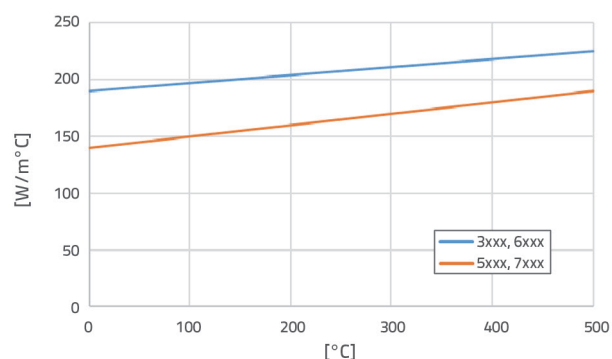
1.2. Aluminijske konstrukcije u požaru

Sve veću pozornost pridaje se ekstremnim djelovanjima na konstrukcije, a požar se s obzirom na mogućnost 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 oštećivanja materijalnih dobara. Nažalost, najčešće nesreće dovedu do toga da se u obzir počnu uzimati pojedina izvanredna opterećenja pa je tako veće promjene u propisima o zaštiti od požara pokrenula tragedija u Sao Paulu, u Brazilu, 1974., kada je u požaru poslovne zgrade stradalo 179 osoba. 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. U izvještajima iz istrage napada na tornjeve Svjetskoga trgovačkog centra, jer je projektiranjem bila predviđena mogućnost udara zrakoplova, zaključeno je da je razlog urušavanja nebodera bio dugotrajno izlaganje njegovih nosivih elemenata visokim temperaturama. Naime, pri udaru oštećena je protupožarna zaštita čeličnih nosivih elemenata, koja je dovela do kolapsa konstrukcije otprilike nakon 60 minuta. Požar se kao takav ne može striktno definirati i zato treba sagledati širu sliku istraživanja, počevši od materijala, tipa konstrukcije i samog definiranja požarnog opterećenja. Djelovanje na konstrukciju u požaru u postupku gašenja te redukcija svojstava po izloženosti požaru svakako treba 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 degradacijom mehaničkih svojstava materijala. Nemoguće je predvidjeti gdje i kada će nastati požar. Zato su neophodne preventivne mjere koje će osigurati dostatnu razinu sigurnosti i odgoditi otkazivanje konstrukcije barem onoliko koliko je potrebno za sigurnu evakuaciju svih korisnika u slučaju pojave požara. 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 mehanička svojstva degradiraju već pri temperaturama višima od 100 °C. Znatne degradacije mehaničkih svojstava aluminijskih legura javljaju se pri temperaturama višima od 200 °C. S obzirom na to da razvoj temperature u nekome materijalu ovisi o toplinskim svojstvima toga istog materijala, važno je proučiti specifični toplinski kapacitet (slika 6.) te koeficijent toplinske vodljivosti (slika 7.) 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 metal ima dva puta manju površinu emisije u odnosu na ugljični čelik [17].



Slika 6. Specifični toplinski kapacitet aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi



Slika 7. Koeficijent toplinske vodljivosti aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi

Konstitutivno ponašanje aluminijskih legura pri povišenim temperaturama uvelike je pod utjecajem vremenski ovisnih deformacija – puzanja. Kada su metalni elementi izloženi temperaturama višima od 170 °C dulje od 30 minuta, potrebno je sagledati i učinke prolaznoga 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 [18].

1.3. 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.

U Europi nosive aluminijske elemente proračunava se u skladu s modelima koje daju Eurokod 9 i nacionalni dodaci. Dio 1-1 [15] daje opća pravila za konstrukcije, a dio 1-2 [22] pravila za projektiranje konstrukcija otpornih na požar. Dijelovi od 1-3 do 1-5 bave se specifičnim segmentima aluminijskih konstrukcija. Problematika požara, kao izvanrednog djelovanja na nosivu konstrukciju, zastupljena je u sedam od deset eurokodova. Za površine izložene požaru toplinsko djelovanje dano je neto

Tablica 2. Međunarodni standardi za projektiranje aluminijских konstrukcija

Međunarodni standardi za projektiranje aluminijских konstrukcija	
Oznaka standarda	Naslov standarda (opis)
AA ADM-2020 [19]	Priručnik za projektiranje aluminija
Australski/Novozelandski standard: AS/NZS 1664:1997 [20]	Aluminijске konstrukcije
Europski standard: EN 1999:2007 [15]	Projektiranje aluminijских konstrukcija
Kineski standard: GB 50429-2007 [21]	Pravila za projektiranje aluminijских konstrukcija

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. Ispitivanjima redukcije mehaničkih svojstava određeni su omjeri dogovorne granice popuštanja pri povišenim i pri sobnim temperaturama te su zadani eurokodom. Vrijednosti su definirane do temperature od 550 °C pri izloženosti temperaturi u periodu od dva sata. Ista problematika ispitana je i za modul elastičnosti većine legura, a preostale tek trebaju biti dokumentirane budućim ispitivanjima. Proizvodnja podliježe postupcima kontrole gdje svaka kombinacija legure i tempera izvedena za pojedino tržište, odnosno u skladu s pripadajućom normom, uz striktnu zahtjeve u specifikacijama, definira pojedinu leguru. S obzirom na sve veću popularnost aluminija, Dokšanović et al. [23] bavili su se obradom rezultata zadanih normom u odnosu na one vrijednosti određene eksperimentalno kako bi što točnije procijenili mehanička svojstva. Na različitim aluminijским legurama serije 6xxx ispitivanjem savojne otpornosti Montuori et al. [24] pokazali su kako pravilnikom definirane vrijednosti mogu biti vrlo konzervativne u odnosu na one dobivene eksperimentalno. Ponekad propisi zanemaruju karakteristične razlike između aluminija i čelika te primjenjuju slične metodologije. Dodatnim ispitivanjima i valorizacijom mogu se upotrijebiti kako bi se u obzir uzelo pojedinosti svakog materijala i konstrukcija [25]. Eurokod 3, dio 1-2 [26], predlaže općeniti model naprezanja-deformacije za čelik u požaru, a koji se sastoji od linearnog dijela, eliptičnog i platoa granice istezanja. Takav prijedlog modela sadržava i implicitnu komponentu puzanja, čiji su utjecaj istraživali Torić et al. [27] 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 se oblik tipične krivulje naprezanje-deformacija za aluminij razlikuje od one za čelik, Eurokod 9, dio 1-2 [22], općeniti model za aluminij u požaru bazira na tipu krivulje koju predlažu Ramberg-Osgood [28]. 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 trenutačne vrijednosti su, ovisno o leguri, nesigurne ili previše konzervativne pri projektiranju požarne otpornosti [29]. Tu bi

tezu svakako trebalo dodatno ispitati usporedbom različitih tipova ispitivanja.

2. Pregled istraživanja

2.1. Eksperimentalna ispitivanja na aluminijским uzorcima

Mnogi istraživački timovi rade u cilju što potpunijeg razumijevanja svojstava aluminijских legura i ponašanja konstrukcija izrađenih od njih. Georgantzia et al. [30] iscrpno su obradili dosadašnje spoznaje eksperimentalnih, numeričkih i analitičkih radova pod cijelim spektrom uvjeta i namjena aluminijских legura. Mnoge postojeće studije fokusirale su se na ispitivanje materijalnih svojstava aluminijских legura i ponašanja konstrukcija od aluminija na sobnim temperaturama, ali njihovo ponašanje 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 prikazan je u tablici 3.

Jedan od začetnika teorijskog i eksperimentalnog istraživanja utjecaja puzanja na izvijanje aluminijских stupova bio je Chapman [63], pokušavajući predvidjeti gubitak stabilnosti pri konstantome opterećenju. Izvijanje aktualnih aluminijских legura ispitivano je brojnim eksperimentima pri sobnoj temperaturi [38, 40, 41, 45, 47, 49, 51, 52].

Kaufman je usporedio rezultate vlačnih ispitivanja svojstava više od 150 aluminijских legura i pripadajućih tempera pri različitim povišenim temperaturama. Upozorio je na to kako za većinu aluminijских legura odnos modula elastičnosti pri povišenim temperaturama i pri sobnoj temperaturi ne opada jednako poput odnosa dogovornih granica popuštanja u navedenim uvjetima [64]. Da bi se istražilo vremenski ovisne deformacije ili naprezanja, posebno kada je materijal podvrgnut povišenim temperaturama, Shivakumar et al. [65] proveli su testove puzanja aluminijске 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. [66] na čeliku te Kumar et al. [67] na aluminiju pri temperaturi od 150 °C. Spoznato je da oblik krivulje naprezanje-deformacija varira njihovom poveznicom ovisno o vrsti aluminijске legure. Nadalje, oblik krivulje naprezanje-deformacija iste legure nije jednake forme kada je legura pri sobnoj temperaturi i kada je izložena požarnome opterećenju [29, 62].

Tablica 3. Eksperimentalna ispitivanja na aluminiju

ISPITIVANJA PRI SOBNOJ TEMPERATURI		
Tip ispitivanja	Materijal	Referenca
Vlačno	Al – 6xxx, 7xxx – T6	[31] (2009.)
Vlačno (i ciklička)	Al – 6082, 7020 – T6	[32] (2018.)
Vlačno	Al – 7075 – T6	[33] (2021.)
Savijanjem*	Al – 6061 – T6	[34] (2015.)
Savijanjem	Al – 6061 – T6, 6063 – T5	[35] (2017.)
Tlačno	Al	[36] (1997.)
Tlačno	Al – 6082 – T4, 6082 – T6	[37] (1997.)
Tlačno	Al – 6060 – T4, 6060 – T6	[38] (1997.)
Tlačno	Al – 6082 – T4, 6082 – T6	[39] (1999.)
Tlačno	Al – 6xxx	[40] (2000.)
Tlačno	Al – 6063 – T5, 6061 – T6	[41] (2006.)
Tlačno (i/ili savijanjem)*	Al – 6061 – T6	[42] (2006.)
Tlačno (i/ili savijanjem)	Al – 6061 – T6	[43] (2006.)
Tlačno*	Al – 6082 – T6	[44] (2010.)
Tlačno	Al – 6xxx	[45] (2011.)
Tlačno*	Al – 6061 – T6, 6063 – T5	[46] (2014.)
Tlačno*	Al – 6061 – T6, 6063 – T5	[47] (2015.)
Tlačno (ekscentrično)	Al – 6082 – T6	[48] (2016.)
Tlačno*	Al – 6061 – T6, 6063 – T5	[49] (2017.)
Tlačno (ekscentrično)*	Al – 6082 – T6	[50] (2019.)
Tlačno*	Al – 6061 – T6	[51] (2020.)
Tlačno*	Al – 7A04 – T6	[52] (2020.)
Posmično*	Al	[53] (2020.)
Posmično	Al – 6061 – T6	[54] (2021.)
ISPITIVANJA PRI POVIŠENOJ TEMPERATURI		
Tip ispitivanja	Materijal	Referenca
Vlačno	Al – 6082 – T6	[16] (2017.)
Vlačno	Al – 6063 – T5, 6061 – T6	[55] (2019.)
Vlačno	Al – 6082 – T6	[56] (2019.)
Vlačno	Al – 6xxx, 7020 – T6	[57] (2020.)
Vlačno	Al – 6063 – T5	[58] (2023.)
Tlačno*	Al – 6082 – T6, 7108 – T79	[59] (2000.)
Tlačno	Al – 5083 – H111, 6060 – T6	[60] (2009.)
Tlačno*	Al – 6061 – T6	[61] (2018.)
Tlačno*	Al – 6063 – T5	[62] (2023.)

*testovima je prethodilo vlačno ispitivanje uzorka materijala kako bi mu se odredila mehanička svojstva

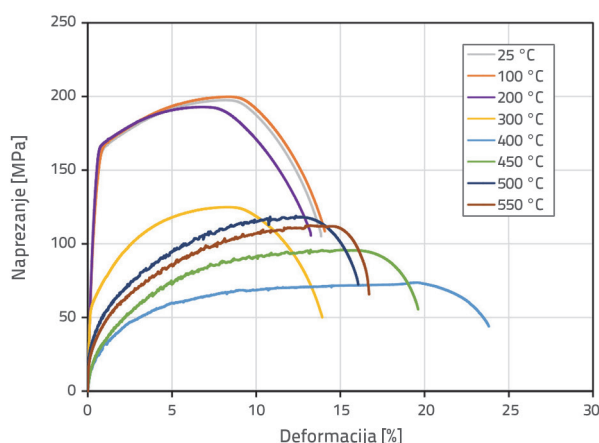
Maljaars et al. [60] proveli su brojna eksperimentalna ispitivanja kako bi definirali odnose naprezanja i deformacija aluminijskih legura pri povišenim temperaturama te samo ponašanje legure u takvim uvjetima, stavljajući težište na utjecaj puzanja materijala. U ispitivanjima na leguri 6060-T66, potrebnima za određivanje mehaničkih svojstava, varirali su veličinu raspona odnosno brzinu prirasta deformacije ovisno o tome je 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 temperaturnome rasponu 175 °C do 350 °C. Zato treba razmatrati pasivnu zaštitu od požara koja bi bila prikladna barem za navedeni raspon. Dodatno treba voditi računa o tome da bude dovoljno fleksibilna za deformacije koje se mogu javiti uslijed temperaturnog opterećenja [68]. Jiang et al. [61] istraživali su ponašanje stupova od aluminijske legure 6061-T6 pri tlačnome opterećenju i defektima proizišlima 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 izloženosti ispitnoj temperaturi, provedeni 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 tako 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 vremenskome intervalu do 20 sati. Nakon analize legure 6082-T6 eksperimentalno iskazanim postupcima određen je kritični interval temperatura za razvoj deformacije od puzanja u rasponu od 200 °C do 300 °C. Dodatno, predložen je analitički model deformacija zbog puzanja koji se pokazao odgovarajućim za prikaz rezultata testova deformacija uzimajući u obzir sve tri faze puzanja.

Liu et al. [56] bazirali su rad na aluminijskoj leguri 6082-T6, a uzorke su zagrijavali na osam različitih temperatura u rasponu od 100 °C do 550 °C i potom ih prirodno hladili ili hladili vodom, što je simuliralo gašenje požara vodom. Potom su provedena stacionarna vlačna ispitivanja preostalih mehaničkih svojstava pri sobnoj temperaturi. Su et al. [55] 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. [58] su na leguri 6063-T5 proveli testove zagrijavanja brzinom od 15 °C/min u rasponu temperatura od 20 °C, koja predstavlja sobnu temperaturu i inicijalna mehanička svojstva, do 550 °C te postpožarno ispitivanje materijala. Nakon što bi

postigli ciljane temperature, uzorci su tijekom 30 minuta prošli fazu izlaganja testnoj temperaturi te su ostavljeni da se prirodno hlade. Geometrija uzorka i brzine prirasta opterećenja u skladu su s onima danima u EN ISO 6892-1 [69]. Još jednom potvrđen je znatan utjecaj toplinskog djelovanja na svojstva konstruktivne aluminijске legure, posebno pri temperaturi višoj od 200 °C, te je predložen niz modela za procjenu preostalih svojstava. Dodatno su proveli i tlačna ispitivanja [62] na stupovima od istoimene legure izložene jednakim uvjetima, pri čemu su skrenuli pozornost na često zanemaren utjecaj očvršćivanja materijala.



Slika 8. Krivulje naprezanja-deformacije na uzorku debljine 4 mm [58]

Zbog svojih svojstava aluminij se u zadnje vrijeme ispituje i u obliku kompozitnih greda od aluminijских 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 izbjegle površinske rupičaste korozije kojoj su neke legure sklone [70]. S obzirom na potrebe i primjenu, aluminijске legure ispituju se na svim razinama i u drugim srodnim strukama [71-73], što može doprinijeti širem pogledu i stvarnim primjenama u graditeljstvu. Chybiński et al. [74] ispitali su uzorke 6060-T6 pod statičkim i dinamičkim režimima opterećenja te usporedili promjene na mikrostrukтури. Većina ispitivanja provedena je i na sobnim i pri povišenim temperaturama kako bi se uočile promjene u materijalu. Upravo legura 6060 zbog karakteristične mikrostrukture legure ima sklonost jamičastoj koroziji, no toplinskom obradom odnosno umjetnim dozrijevanjem poboljšava se korozijsko ponašanje [75, 76].

Uz česte simulacije primjenjivane paralelno s eksperimentalnim testovima kako bi se ispitala njihova validnost sve su popularnije metode simulacija programima poput ABAQUS-a, u kojima se izrađuju FE modeli ili numeričke analize koje se validiraju podacima dostupnima u literaturi [77-80]. Numeričke simulacije svojevrsan su 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 [77, 78]. Aluminijске legure karakterizira velika varijabilnost na konstitutivnoj razini, što se odražava 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 materijalna svojstva i svojstva za kalibraciju. Utjecaj naprezanja uključen je 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.

2.2. Procjena svojstava i ponašanja aluminijских legura

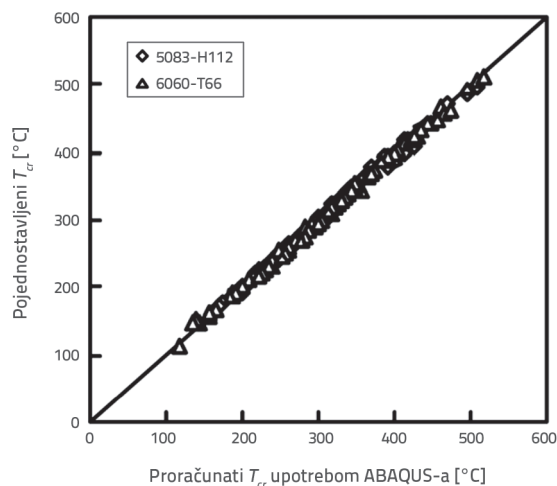
Mikrostrukтура aluminija formirana je u obliku kristalnih rešetki i samim time sklona pogreškama koje karakteriziraju njegova svojstva. Poseban tip pogrešaka su praznine, najčešće nastale toplinskom obradom metala, a koje omogućavaju difuzijsko gibanje atoma krutog metala. Uslijed duljeg izlaganja metalnog materijala opterećenju javlja se fenomen puzanja, koji je posebno izražen ako se događa pri višim temperaturama. Općenito 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 znatan utjecaj na smanjenje čvrstoće i zato je tematika puzanja, osobito u požarnim uvjetima, bila atraktivna od početka primjene aluminija.

Počeci istraživanja deformacija od puzanja metalnih greda u nestacionarnim procesima zagrijavanja u požaru počinju Harmathyjevim istraživanjem [81, 82]. Harmathy je uvidio važnost puzanja u procesima nalik požaru i izradio „prošireni“ model na bazi izvorno predloženog Dornova modela puzanja [83], koji se već u pedesetim godinama 20. stoljeća zalagao za eksperimentalne verifikacije puzanja uz viđenje puzanja kao posljedice mikrostrukturnih promjena uzrokovanih visokom temperaturom. Po Harmathyju, analitičke i numeričke metode nisu bile dovoljno prilagođene praktičnim zahtjevima proračuna greda u procesima zagrijavanja i zato je predložio svoj model, no i dalje postoje ograničenja u obliku raspodjele opterećenja. Početkom 21. stoljeća Suzuki et al. [84] proveli su niz ispitivanja na stupovima i gredama od aluminijских legura pri požarnome opterećenju da bi odredili odnos naprezanja i kritične temperature. Definirali su numeričke izraze za predviđanje

porasta temperature elementa odnosno izraz procjene kritične temperature elementa izloženog zagrijavanju. Model je potvrđen eksperimentalno dobivenim podacima tijekom ispitivanja požarne otpornosti aluminijskih stupova i greda. Maljaars et al. [85] uvidjeli su mane konstitutivnog modela koji predlaže Harmathy [81] odnosno slučajeve kada se on ne može primijeniti. Razvili su model s konačnim elementima kao alat verifikacije konstitutivnog modela za aluminijske legure izložene požaru. Naveli su i da postojeći model nije reprezentativan za seriju legura 6xxx jer ju karakterizira rani razvoj terciarne faze puzanja. Naime, Maljaars et al. [29] odabrali su dvije učestale konstruktivne legure koje imaju drugačiji odziv na povišenim temperaturama, 5083-O/H111 i 6060-T66, za razvoj konstitutivnog modela modificiranjem postojećeg Dorn-Harmathyjeva 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 naprežanja od 20 N/mm² do 100 N/mm². Već spomenuta ispitivanja Maljaars et al. [68] dovela su do modificiranog modela odnosa naprežanja-deformacija u nestacionarnome režimu za aluminijske legure izložene požarnome opterećenju, koji je prvotno predložio Dorn odnosno Harmathy. Uz prilagodbu parametara svojstvenih za pojedinu leguru Maljaarsovo proširenje modela primjenjivao je i Soyal [86] koji ga je validirao nestacionarnim testovima s rastućom temperaturom i konstantnom ili promjenjivom silom. Također, upućuje na razlike zavarenih odnosno nezavarenih uzoraka. Razlike u čvrstoći između zone utjecaja topline (engl. *Heat Affected Zone* - HAZ) i osnovnog materijala opadaju s porastom temperature, ali pri temperaturama od 300 °C i višima podudaraju se. Sličnu tematiku obradili su Kandare et al. [87] kada su prema izvornim prijedlozima Maljaarsa i suradnika proveli 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. Zato je, unatoč skladu eksperimentalnih i analitičkih rezultata, treba uzeti s oprezom. Fogle et al. [88] predložili su jednostavan analitički model za predviđanje pojava otkazivanja u slučaju požara ne uzimajući u obzir utjecaj puzanja i početnih nepravilnosti. Ispitivanja su provedena na pločama varirane geometrije pod tlačnim opterećenjem i izloženosti konstantnome toku topline.

Nastavno na istraživanja razvoja deformacija puzanja u čeliku, Torić et al. [89] proučavali su istu tematiku na aluminiju izloženome 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 6082-T6, primjenjiv na bilo koji metal koji karakterizira puzanje pri povišenoj temperaturi uz radom definirana ograničenja. Zheng i Zhang [90] su na gredama izrađenima od aluminijskih

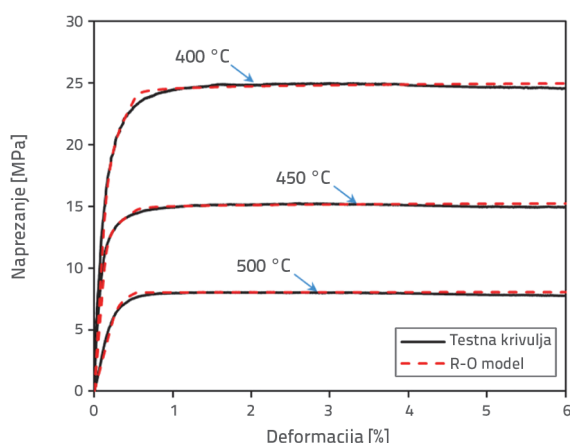
legura 5083-H112 i 6060-T66 proveli istraživanja nezaštićenih i zaštićenih aluminijskih greda pri normalnim i pri visokim temperaturama. S obzirom na izrađene modele i provedena ispitivanja upozorili su na konzervativan pristup kritičnoj temperaturi izračunanoj u skladu s Eurokodom 9. Predstavljene su pojednostavljene formule za prirast temperature odnosno, ovisno o leguri, proračun kritične temperature. Usporedba rezultata pojednostavljenih izraza i vrijednosti dobivenih ABAQUS-om upućuje na dobro podudaranje rezultata (slika 9). Pojednostavljeno dobiveni rezultati uspoređeni su i s eksperimentalno dobivenim podacima, pri čemu se također vidi dobro slaganje, uz nešto konzervativnije, pojednostavljeno dobivene vrijednosti.



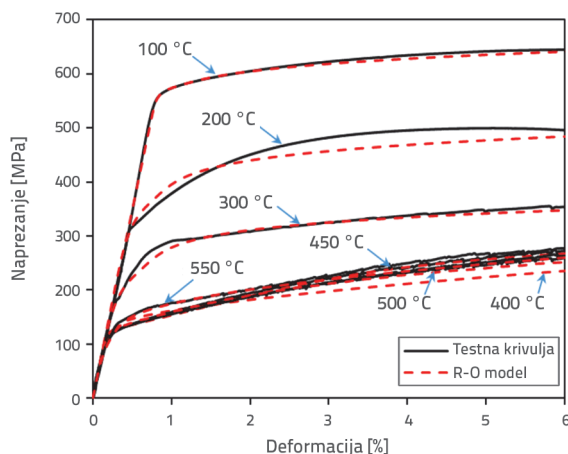
Slika 9. Usporedba kritične temperature [90]

Megalingam et al. [91] proveli su ispitivanja pri konstantnoj temperaturi od 250 °C kako bi proučili ponašanje pri puzanju aluminijske legure 7075 uz visoke, konstantne uvjete naprežanja i pri visokim temperaturama. Za opisivanje puzanja korišten je Norton-Baileyjev izraz koji povezuje prirast puzanja s primijenjenim naprežanjem, temperaturom i materijalnim svojstvima. Ključnu ulogu u predviđanju puzanja ima eksponent deformacije koji je ovim radom određen kao $n = 4,6$ za raspon naprežanja od 30 do 70 MPa i već navedenu temperaturu. Modeliranjem odnosa deformacija puzanja i očvršćivanja starenjem pod različitim toplinskim i mehaničkim opterećenjima [92] definiran je cijeli set konstitutivnih modela ispitivanjem aluminijske legure 7050, koji prvi put ima sposobnost učinkovito predvidjeti ključna mikro i makrosvojstva bez obzira na različita inicijalna stanja i povijest opterećenja nekog elementa. Sun et al. [93] proveli su opsežna ispitivanja na leguri 7075-T6 određivši krivulje i svojstva materijala tijekom požara i nakon njega u rasponu od 20 °C do 550 °C. Određeni su koeficijent 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 požara

i nakon njega. Autori su razradili i prilagodili model autora Yun et al. [94], koji su na temelju baze podataka sastavljene od više od 700 krivulja naprezanje-deformacija pri sobnoj temperaturi predložili modificirani dvostupanjski Ramberg-Osgoodov model. Eksperimentalno određene krivulje naprezanja-deformacije za svojstva tijekom požarnog djelovanja i nakon njega uspoređene su s onima predviđenima na temelju objedinjenoga dvostupanjskog modela iz čije se dobre korespondencije potvrđuje njegova primjenjivost.



Slika 10. Usporedba izmjerenih i modelom predviđenih krivulja naprezanja-deformacije tijekom požara [93]



Slika 11. Usporedba izmjerenih i modelom predviđenih krivulja naprezanja-deformacije nakon požara [93]

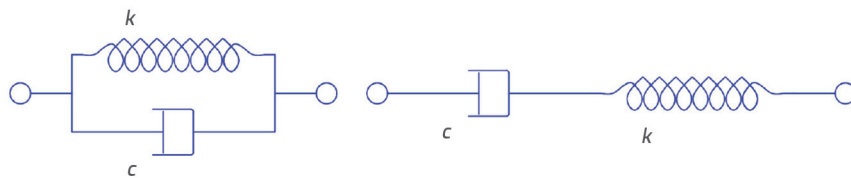
Nabarro [95] je napravio opsežan pregled i otvorio mnoga pitanja i sumnje u uvjerljivost teorija modela čistih metala. Uvidio je razlike u zaključcima različitih skupina autora koji su ispitivali slične materijale vrlo sličnim metodama i uz slične uvjete ispitivanja. Unatoč tome jednom od obrađenih teorija Spigarelli i Sandström [96] razvili su osnovni model puzanja prvotno razvijen za bakar i

austenitni nehrđajući čelik, a potom primijenjen na čisti aluminij. Model ne uključuje podesive parametre, već su svi unaprijed određeni i zato je potpuno predvidiv. Za procjenu razine puzanja potrebno je eksperimentalno odrediti sastav metala, naprezanje i temperaturu. Takav model, ako se dokaže dovoljno pouzdanim, izvrsna je baza za daljnji razvoj na legurama aluminija očvršćivanih dozrijevanjem.

3. Reološko modeliranje aluminija

Usklađenost određenog broja modela koji se predlažu za predviđanje pojedinih materijalnih svojstava važan je korak u razvoju kvalitetnoga reološkog modela. To su 1973. među prvima uvidjeli Helman i Creus [97], koji su na primjeru betona predložili prvi reološki model za opisivanje nelinearnih deformacija i otkazivanja nosivosti. Razvili su izraze za trenutačne i vremenski ovisne deformacije pri konstantnome naprezanju. Odgovarajuće 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. [98] na čeliku su proveli ciklička ispitivanja s naprezanjima ispod granice tečenja te promatrali utjecaj topline proizilje iz cikličkih procesa na materijal. Za simulaciju viskoelastičnih odgovora primjenjivali su 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 elastičnome režimu opterećenja te je predložena provjera upravo na aluminiju.

Već su predloženi modeli serijski spojenih Kelvin-Voigtovih elemenata, pri čemu svaki od njih pokriva specifičan tip deformacijskog procesa. Torić i Burgess [99] razvili su reološki model sastavljen od serijski spojenih dvaju Kelvin-Voigtovih elemenata, 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 [100], a potom i na vlastitim ispitivanjima na čeliku klase S275 odnosno aluminijskoj leguri 6082-T6 [89, 100] uz kalibraciju elemenata svojstvima dobivenima na čeliku u rasponu temperatura 400 °C do 600 °C odnosno na aluminiju u rasponu temperatura 200 °C do 300 °C. Takav model, pod



Slika 12. Shematski prikaz Kelvin-Voigtova i Maxwelllova reološkog modela

uvjetom odgovarajućih 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 koji karakterizira puzanje pri povišenim temperaturama.

4. Rasprava

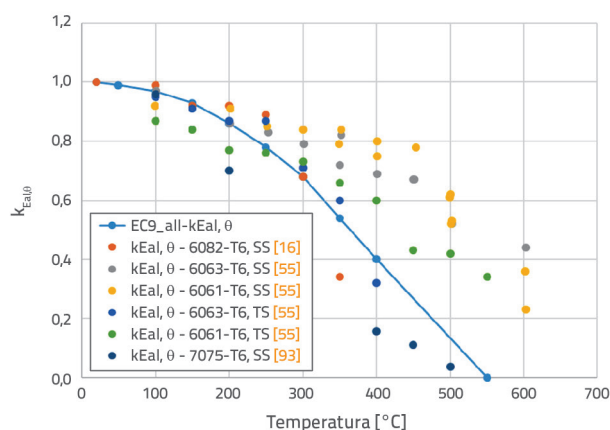
Proučavajući aluminij dolazi se do zaključka da ga se ne može promatrati kao jedan materijal. Aluminij predstavlja skupine legura različitih svojstava, pri čemu se mehanička svojstva legura dodatno razlikuju unutar iste skupine. Konačne razlike ovise o pripadajućem temperu. Zbog toga istraživači sve više provjera izvode na različitim legurama uz iste uvjete ispitivanja. Montuori et al. [24] su s više od 100 eksperimentalnih ispitivanja aluminijских legura 6060-T66, 6082-T6 i 6005A-T6 (15 provedenih i 86 prikupljenih iz literature) upozorili na konzervativnost normi. Guo et al. [57] 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 upozoreno je i na neke činjenice koje nisu toliko istraživane poput porasta Poissonova koeficijenta s porastom temperature [60] i često zanemarenog utjecaja očvršćivanja materijala kada je riječ o aluminijским legurama [62].
- Iako su u prethodnim radovima određeni minimalni utjecaji duljine vremena izlaganja čeličnih elemenata testnoj temperaturi [56], a s obzirom na to da dulje vrijeme dovodi do izraženijeg razvoja puzanja kod aluminijских elemenata, potrebno je provjeriti koliko čvrstoća ovisi o vremenu izloženosti [29].
- Maljaars i Katgerman smatraju podatke o čvrstoći iznesene u normama nedovoljno pouzdanim jer su određeni stacionarnim testovima koji su lošiji prikaz realne požarne situacije [29]. Međutim, u radu [55] izrazi za granicu tečenja validirani su rezultatima ispitivanja u stacionarnome i nestacionarnome režimu te nisu uočene veće oscilacije u redukcijским faktorima.
- Implicitno puzanje zadano europskim normama također se pokazalo neadekvatnim za pojedina djelovanja požara [27].
- Eurokod [22] 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 naprežanje-deformacija neophodna su barem tri temeljna parametra

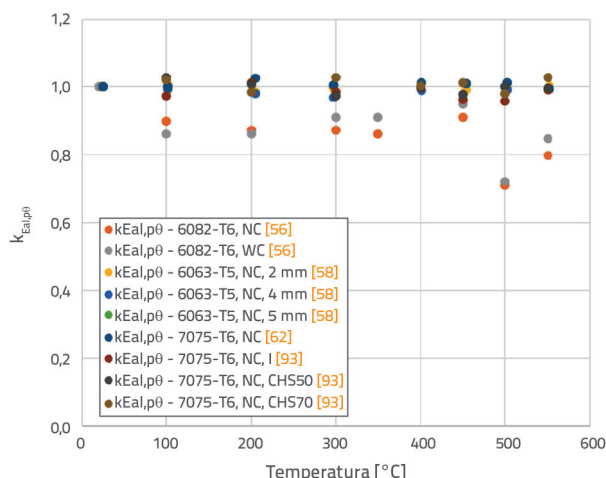
materijala: granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i modul elastičnosti. Zato će posebna pozornost biti usmjerena na zadnju točku.

S porastom temperature znatno se smanjuje nosivost aluminijских 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 aluminijских legura pri povišenim temperaturama. Poznato je i da su uz razlike u obliku krivulja naprežanje-deformacija među legurama znatne razlike i u obliku krivulje iste legure pri sobnoj temperaturi u odnosu na onu pri povišenoj temperaturi [29, 62]. Kao mjeru krutosti materijala uzima se modul elastičnosti koji predstavlja odnos naprežanja i deformacije i može se prikazati krivuljom naprežanje-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 i za svojstva nakon požara. Svi koeficijenti definirani Eurokodom i oni eksperimentalno određeni u literaturi prikazani su na slikama 13. i 14. Na slici 13. 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 u ponašanju pojedinih legura uz neminovnu redukciju modula elastičnosti, što implicira kontinuirani gubitak krutosti s porastom temperature.



Slika 13. Usporedba rezultata ispitivanja modula elastičnosti tijekom požara i Eurokoda 9

Na slici 14. 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 14. Usporedba rezultata ispitivanja modula elastičnosti nakon požara

Rezultati upućuju na mnogobrojne razlike među aluminijским legurama pogodnima za konstruktivnu primjenu. Potrebna su daljnja ispitivanja da bi se popunili nedostaci normi za projektiranje aluminijских konstrukcija. Kako bi se istražilo ključne parametre ponašanja u požaru, neophodno je provesti numeričke analize koje bi reducirale broj potrebnih skupih i složenih eksperimentalnih ispitivanja. U skladu s time javlja se motivacija za razvoj univerzalnoga reološkog modela. Motivacija proizlazi iz potrebe integracije analiza aluminijских konstrukcija u požaru, uzimajući u obzir sve složene i vremenske ovisne komponente deformacija. Cilj je uzeti u obzir sve ključne

termomehaničke varijable: temperaturu i prirast temperature, naprezanje i brzinu prirasta deformacija, koje čine glavne čimbenike ponašanja aluminija tijekom požara. Tako detaljnom i preciznom procjenom utjecaja požara na konstrukciju unaprijedilo bi se razumijevanje složenih procesa koji nastaju pod ekstremnim uvjetima.

5. Zaključak

Zadnjih nekoliko desetljeća, posebno zadnjih nekoliko godina, aluminij se sve češće koristi u inženjerskim domenama rada. Kao najvažniji atribut svakako je istaknuta njegova nosivost naspram vlastite težine, uz izvrsnu otpornost na koroziju. Grade se aluminijски mostovi, a kao konstruktivni materijal sve više zastupljen je na terenu i na *off-shore* konstrukcijama. Svojstva koja aluminij nudi mogu uvelike sniziti troškove kontrole i održavanja. Zato je cilj autora ovog rada na to skrenuti pozornost inženjera projekatana u praksi. Svjesni nedostataka informacija o aluminijским legurama u vidu nosivih konstruktivnih elemenata bit će provedena analiza puzanja. S obzirom na to da je pregledom dosadašnjih studija iskazana problematika požarne otpornosti, na nju će se obratiti posebna pozornost. U cilju što manjih troškova ispitivanja u budućnosti, po eksperimentalnoj analizi ponašanja definirat će se reološki model kako bi mogućnost što točnije procjene opsega oštećenja i statusa materijalnih svojstava nakon izlaganja visokim temperaturama bila lakše dostupna. Radit će se na pronalaženju novih modela puzanja koji bi bili primjenjivi za pojedine legure aluminija, odnosno na poopćenome modelu za aktualne aluminijске legure koje se koriste u građevinarstvu.

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), <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/>, 7.4.2025.
- [3] Environmental Footprint of Semi-Fabricated Aluminum Products in North America Life Cycle Assessment, 2022. The Aluminum Association, <https://www.aluminum.org/sustainability>, 7.4.2025.
- [4] The Crystal by Wilkinson Eyre, 2013. OnOffice magazine, <https://www.onofficemagazine.com/architecture/the-crystal-by-wilkinson-eyre>, 7.4.2025.
- [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>, 7.4.2025.
- [6] The History of Aluminium, 2020. Stellar aluminium systems, <https://stellaraluminium.co.uk/Blog/the-history-of-aluminium/>, 7.4.2025.
- [7] Famous aluminium structures, 2021. Lasered Components Ltd, Essex., <https://lasered.co.uk/news/famous-aluminium-structure/>, 7.4.2025.
- [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/>, 7.4.2025.
- [9] Impressive Aluminium Structures from Around the World, 2019. Paragone, <https://pgceilings.co.za/impressive-aluminium-structures-from-around-the-world/>, 7.4.2025.
- [10] Arvida Aluminium Bridge, Canadian Society for Civil Engineering, <https://legacy.csce.ca/en/historic-site/arvida-aluminium-bridge/>, 7.4.2025.
- [11] Structurae - Structures: Aluminium bridges, <https://structurae.net/en/structures/bridges/aluminum-bridges>, 7.4.2025.
- [12] Longest Canadian Aluminum Pony-Truss Bridge in Brossard, 2012. MAADI group, <https://maadigroup.com/news/longest-canadian-aluminum-pony-truss-bridge-in-brossard/>, 7.4.2025.
- [13] Global Growth Insights - Aluminium for construction market, <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/aluminum-for-construction-market-104707>, 7.4.2025.

- [14] 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, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.710.256>
- [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, <https://doi.org/10.3390/met7040126>
- [17] Boko, I., Skejić, D., Torić, N.: *Aluminijske konstrukcije*, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2017.
- [18] 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, <https://doi.org/10.14256/JCE.2853.2019>
- [19] The Aluminum Association. *Aluminum design manual*. Washington, D.C.; 2020.
- [20] Australian/New Zealand Standard (AS/NZS) Aluminium structures part 1: Limit state design. AS/NZS 1664.1:1997. Standards Australia, Sydney, Australia; 1997.
- [21] GB 50429-2007. Code for design of aluminium structures. Ministry of Construction of the People's Republic of China
- [22] 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]
- [23] Dokšanović, T., Džeba, I., Markulak, D.: Variability of structural aluminium alloys mechanical properties, *Structural Safety*, 67 (2017), pp. 11–26, <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.03.004>
- [24] Montuori, R., Nastro, E., Piluso, V., Pisapia, A.: Ultimate behaviour of aluminium alloy I-beams: New experimental tests and European codification, *Thin-Walled Structures*, 191 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111038>
- [25] Gardner, L., Ashraf, M.: Structural design for non-linear metallic materials, *Engineering Structures*, 28 (2006) 6, pp. 926–934, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.11.001>
- [26] 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]
- [27] Torić, 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, <https://doi.org/10.1108/JSFE-09-2016-016>
- [28] Ramberg, W., Osgood, W.R.: Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Washington, 1942. Technical Note No. 902.
- [29] 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, <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9470-0>
- [30] Georgantzia, E., Gkantou, M., Kamaris, G.S.: Aluminium alloys as structural material: A review of research, *Engineering Structures*, 227 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>
- [31] 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, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.07.013>
- [32] 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, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.291>
- [33] 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, <https://doi.org/10.1111/ffe.13530>
- [34] 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, <https://doi.org/10.1007/s11709-014-0272-8>
- [35] 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, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.053>
- [36] Landolfo, R., Mazzolani, F.M.: Different Approaches in the Design of Slender Aluminium Alloy Sections, *Thin-Walled Structures*, 27 (1997) 1, pp. 805–102
- [37] 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
- [38] Langseth, M., Hopperstad, O.S.: Local Buckling of Square Thin-Walled Aluminium Extrusions, *Thin-Walled Structures*, 27 (1997) 1, pp. 117–126
- [39] 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
- [40] 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
- [41] Zhu, J.-H., Young, B.: Tests and Design of Aluminum Alloy Compression Members, *Journal of Structural Engineering*, 132 (2006) 7, pp. 1096–1107, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2006\)132:7\(1096\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:7(1096))
- [42] Zhu, J. H., Young, B.: Aluminum alloy circular hollow section beam-columns, *Thin-Walled Structures*, 44 (2006) 2, pp. 131–140, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2006.02.006>
- [43] 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, <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94452006132:121955>
- [44] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.01.015>
- [45] 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, <https://doi.org/10.1061/ASCEST.1943-541X.0000289>
- [46] 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, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST)

- [47] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.01.013>
- [48] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.010>
- [49] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.06.034>
- [50] 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), <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106207>
- [51] 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), <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107821>
- [52] 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, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002773](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002773)
- [53] Rouholamin, M., Gunalan, S., Poologanathan, K., Karampour, H.: Experimental study of roll-formed aluminium lipped channel beams in shear, *Thin-Walled Structures*, 153 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106687>
- [54] Yuan, L., Zhang, Q., Luo, X., Ouyang, Y., Yin, J.: Shear resistance of aluminum alloy extruded H-Section beams, *Thin-Walled Structures*, 159 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107219>
- [55] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.012>
- [56] Liu, Y., Liu, H., Chen, Z.: Post-fire mechanical properties of aluminum alloy 6082-T6, *Construction and Building Materials*, 196 (2019), pp. 256–266, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.237>
- [57] 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, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003002](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003002)
- [58] Sun, Y., Zhang, K., Gong, G.: Material properties of structural aluminium alloys after exposure to fire, *Structures*, 55 (2023), pp. 2105–2111, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.07.027>
- [59] Djapic Oosterkamp, L., Ivankovic, A., Venizelos, G.: High strain rate properties of selected aluminium alloys, *Materials Science and Engineering*, 278 (2000), pp. 225–235
- [60] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.02.008>
- [61] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.035>
- [62] 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, <https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-12383>
- [63] 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
- [64] Kaufman, J.G.: Properties of Aluminum Alloys: Tensile, Creep, and Fatigue Data at High and Low Temperatures, The Aluminium Association, 1999.
- [65] 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), <https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012027>
- [66] 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, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.850.922>
- [67] 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, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.348>
- [68] Maljaars, L., Twilt, L., Fellingner, J.H.H., Snijder H.H., Soetens, F.: Aluminium structures exposed to fire conditions-an overview, *Heron*, 55 (2010) 2, pp. 85–122
- [69] Metallic materials -- Tensile testing -- Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2019; EN ISO 6892-1:2019)
- [70] 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), <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100319>
- [71] 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, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.02.002>
- [72] 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, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.583>
- [73] Fröck, H., Kappis, L.V., Reich, M., Kessler, O.: A phenomenological mechanical material model for precipitation hardening aluminium alloys, *Metals*, 9 (2019) 11, <https://doi.org/10.3390/met9111165>
- [74] 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, <https://doi.org/10.3390/met9030324>
- [75] Mimica, R., Radošević, J., Slavica-Matešić, S.: Elektrokemijska svojstva aluminijске slitine EN AW 6060, *Strojarsvo*, 53 (2011) 4, pp. 271–275
- [76] 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, <https://doi.org/10.1002/maco.201307349>
- [77] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.11.006>

- [78] Montuori, R., Nastri, E., Piluso, V., Pisapia, A.: Ultimate behaviour of high-yielding low-hardening aluminium alloy I-beams, *Thin-Walled Structures*, 146 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106463>
- [79] 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, <https://doi.org/10.2174/1874-836802115010176>
- [80] Piluso, V., Pisapia, A.: Interactive Plastic Local Buckling of Box-shaped Aluminium Members under Uniform Compression, *Thin-Walled Structures*, 164 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107828>
- [81] Harmathy, T.Z.: A comprehensive creep model, *Journal of Basic Engineering*, 89 (1967) 3, pp. 496–502, <https://doi.org/10.4224/40001531>
- [82] 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, <https://doi.org/10.4224/40001668>
- [83] Dorn, J.E.: Some fundamental experiments on high temperature creep, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8 (1954), pp. 85–116
- [84] 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
- [85] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.06.003>
- [86] Soyal, Z.: Creep of aluminum alloys exposed to fire conditions, University of technology Eindhoven, 2016.
- [87] 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, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.10.010>
- [88] 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, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.014>
- [89] 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, <https://doi.org/10.1002/fam.2643>
- [90] 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, <https://doi.org/10.1002/fam.2275>
- [91] 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, <https://doi.org/10.1007/s11668-024-01917-7>
- [92] 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, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.183>
- [93] 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), <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109581>
- [94] Yun, X., Wang, Z., Gardner, L.: Full-Range Stress–Strain Curves for Aluminum Alloys, *Journal of Structural Engineering*, 147 (2021) 6, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002999](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002999)
- [95] Nabarro, F.R.N.: Creep in commercially pure metals, *Acta Materialia*, 54 (2006) 2, pp. 263–295, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.08.021>
- [96] Spigarelli, S., Sandström, R.: Basic creep modelling of aluminium, *Materials Science and Engineering: A* 711 (2018), pp. 343–349, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.053>
- [97] 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, [https://doi.org/10.1016/0020-7462\(75\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0020-7462(75)90034-7)
- [98] 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, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.152>
- [99] 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. [10.1016/j.jcsr.2016.07.031](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.031)
- [100] Torić, N., Burgess, I.: Rheological modelling of high-temperature stationary creep tests of Grade S275JR steel, *ce/papers*, 4 (2021), Nos. 2 – 4, <https://doi.org/10.1002/cepa>