

Primljen / Received: 8.9.2015.

Ispravljen / Corrected: 18.1.2016.

Prihvaćen / Accepted: 29.1.2016.

Dostupno online / Available online: 10.4.2016.

# Deformacijske karakteristike aluminijskih legura

## Autori:



Prof.dr.sc. **Mitar Mišović**, dipl.ing.met.  
Sveučilište Crne Gore  
Metalurško-tehnološki fakultet Podgorica  
[mitarm@ac.me](mailto:mitarm@ac.me)



Dr.sc. **Nebojša Tadić**, dipl.ing.met.  
Sveučilište Crne Gore  
Metalurško-tehnološki fakultet Podgorica  
[nebojsa@ac.me](mailto:nebojsa@ac.me)



Prof.dr.sc. **Duško Lučić**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Crne Gore  
Građevinski fakultet Podgorica  
[dusko.lucic.666@gmail.com](mailto:dusko.lucic.666@gmail.com)

Prethodno priopćenje

**Mitar Mišović, Nebojša Tadić, Duško Lučić**

## Deformacijske karakteristike aluminijskih legura

Primjena aluminijskih legura za građevinske konstrukcije zahtijeva poznavanje njihovih karakteristika u elastičnoplastičnom području. Deformacija legura u tom području može se opisati Ramberg-Osgoodovom jednadžbom. U radu su prikazani rezultati vlačnog ispitivanja legura AW-5083 i AW-2024 i potvrđeno je da Hollomonova jednadžba može pouzdano opisati deformacijsko očvršćivanje. Na temelju pokazatelja deformacijskog očvršćivanja izvedene su Ramberg-Osgoodove jednadžbe za ove dvije legure.

### Ključne riječi:

aluminijske legure, Hollomonova jednadžba, Ramberg-Osgoodova jednadžba, koeficijent čvrstoće, indeks deformacijskog očvršćivanja

Preliminary note

**Mitar Mišović, Nebojša Tadić, Duško Lučić**

## Deformation characteristics of aluminium alloys

The utilisation of aluminium alloys in structural applications requires knowledge of their characteristics in the elastoplastic area. The deformation of alloys in this area can be described by the Ramberg-Osgood's equation. Tensile test results for AW-5083 and AW-2024 alloys are presented, and it is confirmed that strain hardening can reliably be described with Hollomon equation. Ramberg-Osgood equations are derived for these two alloys based on strain hardening indicators.

### Key words:

aluminium alloys, Hollomon equation, Ramberg-Osgood equation, strengthening factor, strain hardening index

Vorherige Mitteilung

**Mitar Mišović, Nebojša Tadić, Duško Lučić**

## Deformationseigenschaften von Aluminiumlegierungen

Die Anwendung von Aluminiumlegierungen für Bauwerke setzt die Kenntnis des entsprechenden elasto-plastischen Materialverhaltens voraus. Verformungen von Legierungen in diesem Bereich können mittels Ramberg-Osgood's Gleichung beschrieben werden. In dieser Arbeit werden Resultate von Zugversuchen der Legierungen AW-5083 und AW-2024 dargestellt und es wird bestätigt, dass Hollomon's Gleichung zuverlässig die Verformungsverfestigung beschreiben kann. Aufgrund der Indikatoren zur Verformungsverfestigung werden Ramberg-Osgood's Gleichungen für diese beiden Legierungen hergeleitet.

### Schlüsselwörter:

Aluminiumlegierungen, Hollomon's Gleichung, Ramberg-Osgood's Gleichung, Festigkeitskoeffizient, Index der Verformungsverfestigung

## 1. Uvod

Primjena aluminijских legura za građevinske konstrukcije nema dugu tradiciju bez obzira na to što njihova granica elastičnosti i popuštanja može biti veća nego kod običnih konstrukcijskih čelika. Potencijalno, one mogu predstavljati važne građevne materijale zahvaljujući i sljedećim karakteristikama [1-3]:

- Korozivna postojanost legura ne zahtijeva posebnu zaštitu konstrukcije, što smanjuje troškove održavanja i osigurava tražene zahtjeve u korozivnim sredinama;
- Mala težina omogućuje smanjenje ukupne težine konstrukcije, olakša transport montiranih sklopova, pojednostavi gradnju, smanji opterećenje na temelje i opseg fizičkog posla;
- Proizvodnja profila prešanjem omogućuje da se njihov presjek namjenski prilagodi minimalnoj težini i poželjnoj funkcionalnosti, predvide oblici za ojačavanje koji nisu velikih dimenzija i olakša njihovo povezivanje.

Osim tih spomenutih, i druge karakteristike doprinose sigurnosti konstrukcija. To su:

- otpornost na krti lom (u području niskih temperatura), mala osjetljivost na temperaturni gradijent i zaostala naprezanja;
- otpornost na udare (pozitivan utjecaj brzine deformacije na čvrstoću i žilavost);
- vrlo velik izbor rješenja i suvremenih tehnologija za spajanje elemenata.

Prednost aluminijских legura za konstrukcije može se postići kada se potpuno iskoristi jedno od tri navedena ključna svojstva: otpornost na koroziju (C), mala težina (L) i funkcionalnost presjeka (F). U radovima Dwighta, Kissella, Mazzolania, Lundberga [1-4] te u publikacijama specijaliziranim za aluminij [5-8] dani su brojni primjeri konstrukcija, kao:

- dugački rešetkasti nosači i krovni sustavi u kojima su promjenjiva opterećenja mala u usporedbi s vlastitom težinom;
- konstrukcije na nepristupačnim mjestima daleko od prometnica, tako da su ekonomičan prijevoz i laka montaža iznimno značajni (transmisijski stupovi, stubišta, privremeni mostovi);
- konstrukcije koje se nalaze u korozivnim i vlažnim uvjetima

(krovovi bazena, mostovi, hidrotehnički objekti i *offshore* konstrukcije);

- konstrukcije s pokretnim elementima, tako da je servisiranje lako i ekonomično (mobilni mostovi za pješake i motorna vozila, rotacijski mosni kranovi na kružnim bazenima u postrojenjima za pročišćavanje otpadnih voda);
- konstrukcije za posebne namjene, gdje je održavanje posebno teško i težina mora biti ograničena (jarboli, kule za osvjetljenje, portali autocesta, znakovi).

Čak i ako svi ovi slučajevi ne pripadaju samo građevinskom inženjerstvu, upotreba je aluminijских legura u graditeljstvu održiva [9], a i granice primjene se šire, osobito u područjima suvremenih i manje tradicionalnih skupina [10]. Na slici 1. prikazan je izgled tipičnih rešetkastih konstrukcija od aluminijских legura. Za rešetkaste konstrukcije prije svega su iskorištene prednosti (F + L) kriterija, premda se često koriste i prednosti (C) kriterija.

Proračun aluminijских konstrukcija ima izmijenjen redoslijed u odnosu na čelične, budući da se najprije provjeri dopušteni progib, a nakon toga se kontrolira naprezanje i kapacitet konstrukcijskih elemenata [11, 12]. Provjera progiba poprečnog presjeka aluminijškog elementa može se riješiti njegovim izjednačavanjem s progibom čeličnog elementa. Jednadžba je

$$\frac{5ql^4}{384 I_C E_C} = \frac{5ql^4}{384 I_{Al} E_{Al}} \quad (1)$$

gdje su:

$E_C, E_{Al}$  - moduli elastičnosti čelika i aluminija;

$I_C, I_{Al}$  - momenti tromosti čelika i aluminija,

$q$  - opterećenje,

$l$  - raspon konstrukcije.

Kako za module elastičnosti vrijedi odnos  $E_C \approx 3E_{Al}$  za isto opterećenje i raspon, odnos momenata tromosti poprečnog presjeka treba zadovoljavati uvjet

$$I_{Al} \approx 3I_C \quad (2)$$

Za određivanje kritičnih naprezanja i faktora sigurnosti konstrukcija od aluminijских legura, potrebno je poznavati karakteristike



Slika 1. Primjeri rešetkastih konstrukcija od aluminijских legura [4, 7]

čvrstoće i plastičnosti u elastičnoplastičnom području opterećenja. Analitička ovisnost koja se primjenjuje za opis deformacijskog ponašanja u ovom području jest Ramberg-Osgoodova jednadžba. Ta empirijska, nelinearna jednadžba povezuje modul elastičnosti i pokazatelje deformacijskog očvršćivanja s ukupnom deformacijom [13]. Pri statičkom opterećenju jednadžba je

$$\varepsilon = \frac{\sigma_e}{E} + \left( \frac{\sigma_R}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

gdje je:

- $\varepsilon$  - deformacija,
- $\sigma_e$  - naprezanje na granici elastičnosti,
- $\sigma_R$  - stvarno naprezanje,
- $E$  - modul elastičnosti,
- $K$  - koeficijent čvrstoće,
- $n$  - indeks (eksponent) deformacijskog očvršćivanja.

Kod cikličnog opterećenja, uz ove karakteristike, potrebno je uzeti u obzir i utjecaj broja ciklusa, što prikazuje Manson-Koffinova jednadžba [14]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \quad (4)$$

gdje je:

- $\varepsilon$  - deformacija,
- $\sigma'_f$  - koeficijent zamorne čvrstoće,
- $N$  - broj ciklusa,
- $\varepsilon'_f$  - koeficijent zamorne duktilnosti,
- $b$  - indeks (eksponent) zamorne čvrstoće,
- $c$  - indeks (eksponent) zamorne duktilnosti.

Indeksi deformacijskog očvršćivanja, zamorne čvrstoće i duktilnost povezani su, prema [14], odnosom:

$$n = \frac{b}{c} \quad (5)$$

a koeficijenti čvrstoće, zamorne čvrstoće i duktilnost odnosom

$$K = \frac{\sigma'_f}{\varepsilon_f^{b/c}} \quad (6)$$

Kod rasterećenja, elastoplastično ponašanje materijala uvjetuje odstupanja od početnog ponašanja materijala izazvana mehaničkom histerezom.

Deformacijsko ponašanje na temelju primjene Ramberg-Osgoodove jednadžbe za aluminijske konstrukcije propisano

je u EN 1999-1-1 (Dodatak E) [15]. Istraživanja povezana s tim vrlo su aktualna budući da nelinearna ovisnost naprezanja i plastične deformacije zahtijeva laboratorijsko ispitivanje, numeričko modeliranje i projektiranje prilagođeno realnom deformacijskom očvršćivanju [16]. Pouzdani modeli (jednadžbe) pružaju mogućnost simulacije ponašanja konstrukcijskih elemenata primjenom metode konačnih elemenata (MKE) [17]. Kako se parametri u jednadžbi (3) mogu analizirati u funkciji temperature, pruža se mogućnost analize utjecaja potencijalnih požara na ponašanje legura i konstrukcija [18]. Poznavanje utjecaja temperature na deformacijsko ponašanje preduvjet je i za definiranje područja stabilnosti zavarenih konstrukcija [19], te zahtijeva prilagodbu koeficijenata u Ramberg-Osgoodovoj jednadžbi realnim svojstvima zavarenog spoja [20]. To se odnosi i na svojstva žilavosti loma, kada su ona uvjet za primjenu aluminijskih legura [21].

Za laboratorijska ispitivanja primjenjuju se vlačna ili vlačno/tlačna naprezanja (za ciklična opterećenja) [13, 14], ali je aktualna i provjera korekcije jednadžbe za deformaciju sfernim utiskivačem [22].

U ovom su radu prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja deformacijskih karakteristika aluminijskih legura. Izabrane su dvije legure koje se široko koriste u različitim konstrukcijama, a pripadaju dvjema skupinama aluminijskih legura: koje termički očvršćuju i koje termički ne očvršćuju. Eksperimentalno je praćeno deformacijsko ponašanje uzoraka prilikom vlačnog ispitivanja za dva stanja legura (meko-žareno i tvrdo-deformirano). Analizirani su dijagrami mjernih rezultata iz aspekta posebnosti povezanih s deformacijskim starenjem i točnosti vrijednosti naprezanja (posebno tehničke granice popuštanja) za primijenjeni eksperimentalni postupak. Numerička obrada je obuhvatila primjenu Hollomonove jednadžbe za promjenu naprezanja ovisno o stupnju deformacije. Zahvaljujući pouzdanosti primjene te nelinearne jednadžbe za interval plastične deformacije, definirani su koeficijenti u Ramberg-Osgoodovoj jednadžbi. Eksperimentalno određene i izračunane vrijednosti su uspoređene s podacima iz literature.

## 2. Eksperimentalni dio

### 2.1. Materijali i postupak ispitivanja

Ispitivane su legure AW-5083 i AW-2024, čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav ispitanih legura AW-2024 i AW-5083

| Oznaka legure | Udio legirajućih elemenata <sup>1)</sup> , [%] |      |      |      |      |      |       |       |        |
|---------------|--|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|
|               | Cu   | Mg   | Mn   | Si   | Fe   | Zn   | Cr    | Ti    | Al     |
| AW-5083       | 0,015  | 4,23 | 0,42 | 0,13 | 0,26 | 0,02 | -     | -     | Ostalo |
| AW-2024       | 4,8  | 1,41 | 0,42 | 0,13 | 0,28 | 0,07 | ≤0,01 | 0,015 |        |

<sup>1)</sup> Udio legirajućih elemenata u skladu je s: International Alloy Designations and Chemical Composition Limits For Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys, The Aluminum Association Inc., 2009.

Legura AW-5083 je iz sustava Al-Mg-Mn. Zahvaljujući dobroj topljivosti magnezija (Mg) u tvrdj otopini aluminija, legura ima izraženu sposobnost očvršćivanja legiranjem i deformacijom, dobar odnos čvrstoće i duktilnosti, veliku sposobnost oblikovanja u složenim operacijama, korozivsku postojanost i dobru zavarljivost. S obzirom na to da termički ne očvršćuje, ne uključuje kaljenje kod obrade do konačnih dimenzija i svojstva, tako da zadržava visoku točnost dimenzija. Iako legiranje magnezijem pruža mogućnost za postizanje visoke čvrstoće, a da se znatnije ne smanjuje plastičnost, udio od približno 4,5 % Mg pruža adekvatan odnos očvršćivanja legiranjem i deformiranjem. Mangan (Mn) ima primarni utjecaj na procese oporavljanja i rekristalizacije, a samim time na kontrolu veličine metalnog zrna, anizotropije svojstva i teksture.

Plastičnost legura omogućuje pripremu poluproizvoda svih oblika (šipke, limovi, žice, profili, otkivci) postupcima tople i hladne prerade. Poluproizvodi se lako hladno oblikuju konvencionalnim metodama. Zavarljivost legura je vrlo dobra. Legura AW-5083 najčešće se upotrebljava za proizvodnju plovila i ostalih prijevoznih sredstava, zavarenih posuda pod tlakom, marina, televizijskih tornjeva, komponenti raketnih projektila i mnogih drugih dijelova u različitim područjima primjene.

Legura AW-2024 je iz sustava Al-Cu-Mg-Mn. Bakar (Cu) je glavni legirajući element (do 4,9 %). Zahvaljujući promjeni njegove topljivosti u aluminiju s promjenom temperature, javlja se precipitacijsko očvršćivanje tako da legura postiže visoku čvrstoću i zadovoljavajuću duktilnost. Zbog takvih svojstva dugo je u uporabi (Alcoa se proizvodi od 1931. godine). Iz iste skupine su AW-2124 i AW-2324, kao legure povećane čistoće (manji udio željeza i silicija), čime su poboljšane karakteristike žilavosti loma. Dodatno poboljšanje svojstava tih legura zahtijevalo je posebnu zaštitu od korozije. Tako se proizvode *Alclad* stanja u kojima se na površini nanese tanak sloj čistog aluminija (nominalna debljina sloja aluminija je 5 % debljine za limove do 1,57 mm, ili 2,5 % za debljine veće od 1,57 mm [23]).

Legura se završno priprema u žarenom stanju (O) i termički ojačanim stanjima (T3, T4 i T8) [24, 25]. Pogodna je za preradu tako da se primjenjuje za proizvodnju svih oblika poluproizvoda koji se u žarenom stanju dobro završno hladno oblikuju.

Zavarivanje se može izvesti pomoću otpornog ili elektrolučnog postupka u zaštitnoj atmosferi. Zavarivanje bilo kojim postupkom izaziva izrazito pogoršanje otpornosti na koroziju u području zavara, zbog čega zavarene spojeve treba naknadno termički obraditi. Strojna obrada u termički obrađenom i žarenom stanju je dobra. Legura se najčešće upotrebljava za proizvodnju dijelova za zrakoplove, elemente ostalih transportnih sredstava, elemente mostova, uređaja, različitih dijelova strojeva i elemenata za spajanje. Uzorci od legure AW-5083 pripremljeni su od valjane trake početne debljine 1,28 mm, koja je hladno valjana na 1 mm. Za leguru AW-2024 korištena je industrijski valjana traka početne debljine 5 mm, koja je dalje obrađena na debljinu 2 mm, valjanjem na laboratorijskom stroju za valjanje i žarenjem prema planu prikazanom na slici 2. Žarenje uzoraka je završeno u laboratorijskoj peći s točnošću regulacije temperature  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Deformacijski očvrštno stanje legura dobiveno je hladnim valjanjem s redukcijom debljine 20 %. Žarena stanja su označena s O, a deformirana s H.



Slika 2. Načini hladnog valjanja/žarenja traka od legure AW-2024

Vlačno ispitivanje je obavljeno na univerzalnom elektroničkom uređaju za ispitivanja mehaničkih svojstava materijala, tipa HACKERT FPZ 100/1. Uređaj ima mogućnost ispitivanja vlakom, tlakom, smicanjem i savijanjem za opsege sila od 20 N do 100 kN. Mjerni signali sile i promjene dimenzija uzoraka mogu se bilježiti na papiru ili elektronički zapisati. Mjerna skala (uvećanja) za registraciju signala prilagodi se za izabrani uzorak, leguru i stanje.

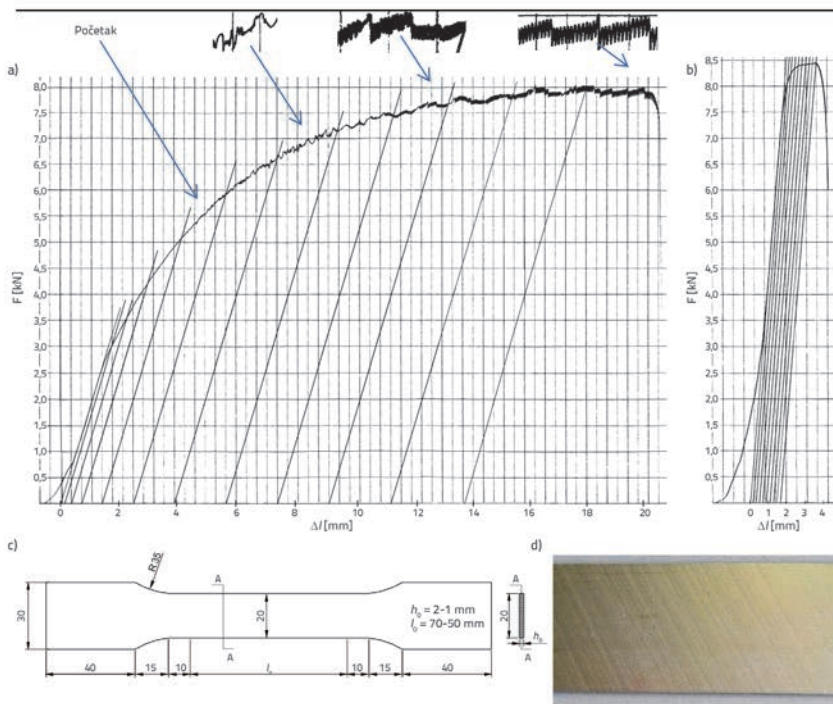
## 3. Rezultati ispitivanja i analiza

### 3.1. Vlačna deformacija

Eksperimentalni dijagrami sila ( $F$ ) - produljenje ( $\Delta l$ ) za žarene i deformirane uzorke od legure AW-5083 prikazani su na slici 3. Karakteristične vrijednosti produljenja za koje je očitana vrijednost sile prikazane su linijama paralelnim početnom elastičnom dijelu dijagrama (slika 3.a i 3.b). Ti su dijagrami zatim iskazani vrijednostima *naprezanje-deformacija*, na temelju kojih su provedene obrada i analiza rezultata. Ispitani uzorci su standardnog oblika i dimenzija. Mjerna duljina uzorka ( $l_0$ ) je prilagođena debljini lima (slika 3.c) [26].

Promjena vrijednosti sile u oba slučaja pokazuje izraženu sposobnost legure za deformacijsko očvršćivanje s različitim učinkom za oba stanja. Razlika dijagrama za žareno i deformirano stanje očituje se u vrijednostima sile, ravnomjernog i ukupnog produljenja. Osim toga, za žareno stanje vrlo je izraženo kolebanje sile u većem dijelu dijagrama (naizmjenično titranje oko prosječne vrijednosti). Kolebanje počinje nakon dostizanja određene konačne deformacije, a prisutno je kod deformacije aluminijskih legura vlakom, tlakom i torzijom u određenom intervalu temperatura i brzina deformacije. Oblik i amplituda kolebanja karakteristični su za pojedine stupnjeve deformacije (izdvojeno su prikazani na slici 3.a). U području manjih deformacija oni su ograničeni, u području srednjih deformacija amplituda i broj ciklusa se povećavaju tijekom deformacije, da bi se u području velike plastične deformacije očitovao približno stacionarni proces za broj ciklusa i veličinu amplitude.

Pojava pravilnog naizmjeničnog povećanja i smanjenja sile naziva se diskontinuirano popuštanje ili Portevin-Le Chatelier efekt. Postoji više modela koji opisuju ovu pojavu. Cottrellov model se temelji na odnosu brzina kretanja otopljenih legirajućih atoma i dislokacija. U slučaju kada koncentracija otopljenih atoma oko dislokacija postaje dovoljna, kretanje



Slika 3. Eksperimentalni dijagrami sila-produljenja legure AW-5083 za: a) žareno; b) hladno valjano stanje s redukcijom debljine 20 %; c) standardni oblik uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava rastezanjem; d) izgled traka tečenja na površini poliranih uzoraka ispitivanih u žarenom stanju

dislokacija se blokira. Broj pokretnih dislokacija se naglo smanjuje, što uvjetuje povećanje naprezanja. Kada naprezanje dosegne vrijednost da se blokirane dislokacije oslobode ili se aktiviraju mehanizmom umnožavanja, povećava se broj pokretnih dislokacija i naprezanje se smanjuje. Naizmjenično povećanje i smanjenje naprezanja izaziva diskontinuitet na liniji očvršćivanja, analogno pojavi deformacijskog starenja. Kako su otopljeni atomi u interakciji s pokretnim dislokacijama, pojava se naziva dinamičko deformacijsko starenje [27].

Pojava diskontinuiteta je praćena i makroskopskim očitovanjem pojave dinamičkog deformacijskog starenja, koja je uočljiva po pravilno raspoređenim trakama tečenja na površini poliranih uzoraka (slika 3.d).

Hladno valjanje lima s redukcijom debljine 20 % izaziva deformacijsko očvršćivanje (prelazak iz O u H stanje). Time se izrazito poveća broj dislokacija. Zato se od početka vlačne deformacije uzorka zahtijeva znatno veće naprezanje, a reakcija između dislokacija (dislokacijskih šumova i spletova) su dominantne u odnosu na reakcije s otopljenim legirajućim atomima. Na dijagramu se ne uočava naizmjenično kolebanje vrijednosti naprezanja, a područje plastičnosti se izrazito smanjuje (slika 3.b).

Rezultati očitani s dijagrama su preračunati na vrijednosti relativne deformacije produljenja ( $\varepsilon$ ) i stvarnog naprezanja ( $\sigma$ ) korištenjem formula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}; \quad \sigma = \frac{F}{A_0}(1 + \varepsilon) \quad (7)$$

gdje je:

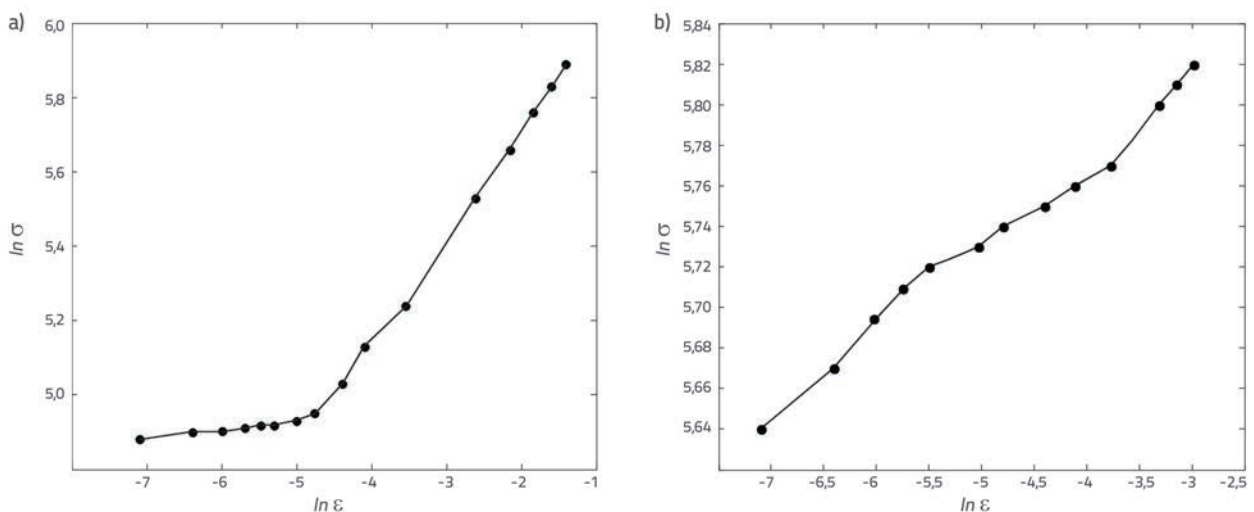
$F$  - vlačna sila

$A_0$  - početni poprečni presjek epruvete

$\Delta l$  - produljenje (povećanje mjerne duljine epruvete rastezanjem)

$l_0$  - početna mjerna duljina epruvete.

Rezultati za leguru AW-5083, u logaritamskom koordinatnom sustavu, prikazani su na slici 4. Za žareno stanje jasno se uočavaju dva područja s različitim koeficijentima deformacijskog očvršćivanja (slika 4.a). Ovakav oblik je poznat kao "2n"



Slika 4. Ovisnost rezultata  $\ln \sigma = f(\ln \varepsilon)$  za stanje legure AW-5083: a) žareno stanje; b) deformirano stanje

deformacijsko očvršćivanje [28]. Deformirano stanje ima zapravo jedinstven oblik u cijelom intervalu plastičnosti (slika 4.b).

Za leguru AW-2024 dobiveni su rezultati koji su analogni rezultatima prikazanim na slikama 3. i 4.

### 3.2. Točnost izmjerenih rezultata

Položaj na dijagramu sila-produljenje (slika 3.) može se precizno očitati do razine 0,5 mm. Kod produljenja, u odnosu na mjernu duljinu standardne epruvete, takva točnost očitavanja odgovara relativnoj deformaciji  $\epsilon = \pm 0,0005$ , što je ujedno i prva očitana vrijednost u području plastične deformacije. U slučaju sile, točnost od 0,5 mm uvjetuje pogrešku od  $\pm 20$  N, odnosno pogrešku kod proračuna naprežanja približno  $\pm 0,6$  N/mm<sup>2</sup>. Kako je u oba slučaja točnost očitavanja zadovoljavajuća, svi rezultati sile i produljenja očitani su s dijagrama oblika prikazanog na slici 3.

Raspršenje vrijednosti tijekom ispitivanja većeg broja uzoraka posebno je važno u odnosu na postavljeni cilj rada. Da bi se ono umanjilo, svi uzorci za ispitivanje su pripremljeni od iste uske trake izrezane od limene ploče u smjeru duljine (smjer valjanja). Trake su precizno valjane na mjernu debljinu laboratorijskim strojem za valjanje. Na taj je način utjecaj "povijesti" na mehanička svojstva sveden na najmanju moguću mjeru. Kao rezultat, razlike naprežanja od srednje vrijednosti za 3 do 5 ispitanih uzoraka iznosile su  $\pm 20$  MPa. Radi usporedbe, kolebanje kod dinamičkog starenja izaziva razlike naprežanje do  $\pm 8$  MPa.

### 3.3. Analitička obrada rezultata

Deformacijsko očvršćivanje aluminijskih legura (u O, T i H stanjima) može se aproksimirati Hollomonovom jednadžbom oblika

$$\sigma = K\epsilon^n \tag{8}$$

Koeficijenti  $K$  i  $n$  su analogni koeficijentima definiranim u jednadžbi (3).

Iako postoji i niz drugih jednadžbi, Hollomonova jednadžba sadrži koeficijente  $K$  i  $n$  koji se mogu precizno odrediti zahvaljujući odgovarajućem fizikalnom značenju. Koeficijent čvrstoće  $K$  odgovara čvrstoći (vrijednosti naprežanja  $\sigma$ ) kada je deformacija ( $\epsilon$ ) jednaka jedinici (na temelju jednadžbe (7), a to znači da povećanje mjerne duljine uzorka  $\Delta l$  dostigne početnu mjernu duljinu  $l_0$ ). Indeks deformacijskog očvršćivanja  $n$  predstavlja brzinu deformacijskog očvršćivanja. U logaritamskim koordinatama ova jednadžba se prevodi na ravnu liniju s odsječkom na  $\ln\sigma$ -osi jednakim  $\ln K$ , i nagibom jednakim  $\tan \alpha = \Delta \sigma / \Delta \epsilon = n$  (slika 4.).

U skladu s tim, svi eksperimentalni podaci su prevedeni na logaritamski koordinatni sustav (linearna funkcija), a zatim je program STATEGRAPHICS CENTURION (slobodno dostupan u testnoj inačici) [29]. Program omogućuje automatsku obradu podataka u linearnom obliku s proračunom koeficijenta, pokazatelja za kriterije pouzdanosti, grafičkim prikazom

Tablica 2. Jednadžbe i statistički pokazatelji za opis deformacijskog očvršćivanja ispitanih legura

| Stanje          | Područje deformacije     | Koeficijenti |        | Jednadžba                          | Br.  | Pokazatelji korelacije      |                                   |
|-----------------|--------------------------|--------------|--------|------------------------------------|------|-----------------------------|-----------------------------------|
|                 |                          | $\ln K$      | $n$    |                                    |      | r-koeficijent <sup>1)</sup> | $s_{est}$ -pogreška <sup>2)</sup> |
| Legura: AW-5083 |                          |              |        |                                    |      |                             |                                   |
| O               | 0 - 0,2483               | 6,0550       | 0,2004 | $\sigma = 426,23\epsilon^{0,2004}$ |      | 0,9548                      | 0,1178                            |
|                 | 0 - 0,0086 <sup>3)</sup> | 5,0441       | 0,0231 | $\sigma = 155,09\epsilon^{0,0231}$ | (9)  | 0,9809                      | 0,0036                            |
|                 | 0,0086 - 0,2483          | 6,2723       | 0,2816 | $\sigma = 529,67\epsilon^{0,2816}$ | (10) | 0,9988                      | 0,0192                            |
| H               | 0 - 0,0509               | 5,9296       | 0,0396 | $\sigma = 375,99\epsilon^{0,0396}$ | (11) | 0,9903                      | 0,0071                            |
| Legura: AW-2024 |                          |              |        |                                    |      |                             |                                   |
| O               | 0 - 0,1968               | 5,9513       | 0,2372 | $\sigma = 384,27\epsilon^{0,2372}$ |      | 0,9876                      | 0,0742                            |
|                 | 0 - 0,0026 <sup>3)</sup> | 4,8306       | 0,0627 | $\sigma = 125,28\epsilon^{0,0627}$ | (12) | 0,9795                      | 0,0096                            |
|                 | 0,0026 - 0,1968          | 6,0457       | 0,2672 | $\sigma = 422,28\epsilon^{0,2672}$ | (13) | 0,9989                      | 0,0202                            |
| H               | 0 - 0,0235               | 5,7296       | 0,0328 | $\sigma = 307,85\epsilon^{0,0328}$ | (14) | 0,9768                      | 0,0070                            |

<sup>1)</sup> Pearsonov koeficijent korelacije za  $n$  parova vrijednosti linearne ovisnosti  $X = \ln(\epsilon)$  i  $Y = \ln(\sigma)$  je:

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \sqrt{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2}}$$

<sup>2)</sup> Standardna pogreška aproksimacije po izvedenoj linearnoj jednadžbi ovisnosti  $X = \ln(\epsilon)$  i  $Y = \ln(\sigma)$  je:

$$s_{est} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y')^2}{N - 2}}$$

<sup>3)</sup> Područja deformacije su izračunana na osnovi presječnih točaka ravnih linija za prvi i drugi interval deformacijskog očvršćivanja

Tablica 3. Usporedbe izmjerenih i izračunanih vrijednosti naprezanja za leguru AW-2024

| Izmjerene vrijednosti |               |               | Proračunate vrijednosti        |             | Razlika naprezanja<br>$\sigma_p - \sigma_m$ [MPa] | Deformacijsko očvršćivanje<br>$\Delta\sigma = \sigma_p - \sigma_{0,01}$ [MPa] |
|-----------------------|---------------|---------------|--------------------------------|-------------|---|---|
| Deformacije           |               | Sila<br>F [N] | Naprezanje<br>$\sigma_m$ [MPa] | Indeks<br>n |   |   |
| $\Delta l$ [mm]       | $\varepsilon$ |               |                                |             |   |   |
|                       | 0,0001        |               |                                |             | 72,01   |   |
| 0,5                   | 0,0005        | 2750,0        | 77,95                          | 0,0627      | 77,83   | -0,13   |
| 1,0                   | 0,0010        | 2850,0        | 80,83                          |             | 81,38   | 0,55  |
| 1,5                   | 0,0015        | 2931,3        | 83,18                          |             | 83,39   | 0,21  |
| 2,0                   | 0,0021        | 3006,3        | 85,35                          |             | 85,00   | -0,35   |
| 2,5                   | 0,0025        | 3146,9        | 89,39                          |             | 85,59   | -3,79   |
| 3,0                   | 0,0031        | 3234,4        | 91,92                          |             | 90,21   | -1,72   |
| 4,0                   | 0,0041        | 3403,1        | 96,82                          |             | 97,31   | 0,49  |
| 5,0                   | 0,0053        | 3562,5        | 101,47                         |             | 104,10  | 2,63  |
| 7,5                   | 0,0077        | 3937,5        | 112,42                         |             | 114,98  | 2,56  |
| 10,0                  | 0,0104        | 4225,0        | 120,94                         |             | 124,53  | 3,58  |
| 19,5                  | 0,0202        | 5096,9        | 147,33                         | 0,2672      | 148,94  | 1,61  |
| 35,0                  | 0,0356        | 5934,4        | 174,12                         |             | 173,16  | -0,95   |
| 55,0                  | 0,0555        | 6650,0        | 198,87                         |             | 195,01  | -3,85   |
| 79,5                  | 0,0806        | 7165,6        | 219,37                         |             | 215,43  | -3,94   |
| 105,0                 | 0,1057        | 7462,5        | 233,78                         |             | 231,65  | -2,13   |
| 129,5                 | 0,1308        | 7701,9        | 246,75                         |             | 245,20  | -1,55   |
| 159,5                 | 0,1610        | 7809,4        | 256,87                         |             | 259,20  | 2,32  |
| 194,0                 | 0,1968        | 7990,6        | 270,94                         |             | 273,49  | 2,55  |

dijagrama i intervala pouzdanosti. Program pruža mogućnost izbora većeg broja funkcija (jednadžbi) koje se provjeravaju i rangiraju u odnosu na izabranu metodu stvaranja funkcionalne ovisnosti i dobivene statističke pokazatelje aproksimacije. U konkretnom slučaju primijenjena je metoda najmanjih kvadrata. Usporedo s Hollomonovom, testirane su i druge jednadžbe koje programski paket može provjeriti. Praćeni su pokazatelji:  $r$  - koeficijent korelacije,  $p$  - vrijednost razine signifikantnosti i  $s_{est}$  - standardna pogreška korelacije. U rezultatima, program prikazuje sve jednadžbe koje imaju te pokazatelje povoljnije ili bliske u odnosu na željenu linearnu jednadžbu [29]. Dobiveni podaci za  $K$  i  $n$ , statistički pokazatelji i odgovarajuće jednadžbe prikazani su u tablici 2. Najniža vrijednost koeficijenta korelacije za linearnu ovisnost treba biti  $r > 0,95$ , kako bi se potvrdila relativno pouzdana ovisnost između varijabli. Empirijska  $p$ -vrijednost kod analize varijance (skraćeno ANOVA) treba biti  $p < 0,05$ , kako bi se potvrdila signifikantnost ovisnosti u intervalu 95 % standardne vjerojatnosti. Standardna pogreška korelacije  $s_{est}$  pokazuje očekivano odstupanje izračunanih vrijednosti primjenom izvedenih jednadžbi za predviđanje rezultata [29].

Rezultati za statističke parametre prikazani u tablici 2. pokazuju da se deformacijsko očvršćivanje legura u oba stanja može pouzdano aproksimirati Hollomonovom jednadžbom. Vrijednosti  $K$  i  $n$  se dovoljno razlikuju za svako ispitivano stanje,

tako da njihovo korištenje zahtijeva prethodno poznavanje podataka za točno odabranu leguru i stanje.

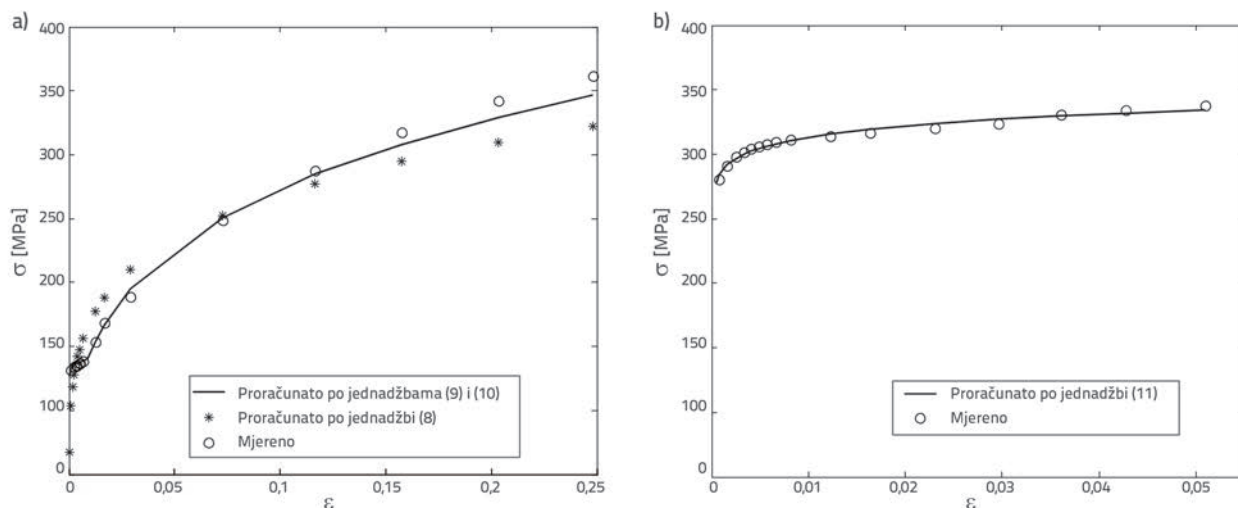
Najniža vrijednost koeficijenta korelacije dobivena je za leguru AW-5083 u žarenom stanju (0,955). Premda je koeficijent veći od 0,95 (i  $p$  vrijednost je manja od 0,05), tako da se korelacija može smatrati zadovoljavajućom, oblik dijagrama na slici 4.a pokazuje očiglednu prisutnost dva područja deformacijskog ponašanja. Zbog toga je primijenjen postupak određivanja jednadžbi s podjelom na dva intervala. Dodatni je razlog podjele taj što prvi interval ima posebno značenje jer obuhvaća granicu elastičnosti i tehničku granicu popuštanja.

Podjelom deformacijskog očvršćivanja na dva intervala, koeficijent korelacije se poboljša u oba intervala i dostiže visoke vrijednosti (0,981 i 0,999), a pogreške aproksimacije se izrazito smanje.

Koeficijent korelacije za deformirano stanje je 0,990, što znači da se cijeli interval plastičnosti može aproksimirati jedinstvenom jednadžbom.

Izmjerene i izračunane vrijednosti za leguru AW-2024 usporedno su prikazane u tablici 3., a za leguru AW-5083 na slici 5.

Kod žarenog stanja legure AW-2024 podjelom se područja na intervale korelacija za prvi interval neznatno smanji (sa 0,988 na 0,979), ali se i pogreška aproksimacije izrazito smanji. Koeficijent korelacije za drugo područje je visok i iznosi 0,999. To potvrđuju i razlike izračunanih i izmjerenih vrijednosti naprezanja ( $\sigma_p -$



Slika 5. Usporedni rezultati za izmjerene i izračunane vrijednosti dijagrama  $\sigma - \varepsilon$  za leguru AW-5083 u: a) žarenom stanju; b) deformiranom stanju

$\sigma_m$ ) prikazane u tablici 3. Tako je opravdano primjenjivati dva intervala i kod ove legure. Za deformirano stanje također je koeficijent korelacije visok i iznosi 0,978, tako da je opravdano primjenjivati jedinstveni interval i jednadžbu.

Na taj način statistički pokazatelji interpolacije nedvosmisleno potvrđuju da se Hollomonova jednadžba (8) može pouzdano primijeniti za opis deformacijskog ponašanja za ispitane legure i njihova stanja. Značajno je identificirati da se kod deformiranog stanja mogu primijeniti jedinstvene jednadžbe (11) i (14) s visokim koeficijentom korelacije, a kod žarenog stanja nužno je koristiti parcijalne jednadžbe (9), (10), (12) i (13). U skladu s ciljem rada, te će se jednadžbe primjenjivati za određivanje graničnih stanja, izvođenje Ramberg-Osgoodove jednadžbe za ukupnu deformaciju, ali i za identifikaciju sposobnosti legura da deformacijski očvršćuju, što je dodatno važno za ponašanje materijala i nosivost konstrukcije.

### 3.4. Granične vrijednosti naprezanja

Upotreba pločastih uzoraka (slika 3.c) za karakterizaciju materijala dostano je složeno zbog različitih vrijednosti svojstava u ravnini i po debljini lima, kao i anizotropije svojstava u ravnini lima ovisno o smjeru ispitivanja. U ovom su radu provedena samo ispitivanjima na uzorcima uzetim u smjeru duljine, odnosno u smjeru valjanja lima. Ako se želi karakterizacija anizotropije, nužno je primijeniti isti postupak za ostale smjerove (najčešće  $\pi/4$  i  $\pi/2$  u odnosu na smjer valjanja).

Eksperimentalno određivanje granice proporcionalnosti ( $\sigma_p$ ) nije ostvareno zato što se postojećim testom ispitivanja deformacijskih promjena ona ne može pouzdano odrediti (zahtijeva se 10 % odstupanja od linearne ovisnosti dijagrama sila-produljenje). Na taj se način ni modul elastičnosti ne može precizno odrediti [30], već su podaci preuzeti iz odgovarajućih normi (tablica 4.).

Tehničku granicu elastičnosti ( $\sigma_e$ ) također nije bilo moguće eksperimentalno odrediti jer je prva pouzdano očitana vrijednost

deformacije znatno veća od normom predviđene trajne deformacije ( $\varepsilon = 0,01$  %). Zato je granica elastičnosti određena na temelju jednadžbi danih u tablici 2. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4.

Tehnička granica popuštanja ( $\sigma_{0,2}$ ), za materijale s ovakvim dijagramom, određuje se za trajnu deformaciju 0,2 %. Tehnička granica popuštanja (također se koristi termin tehnička granica tečenja) uključena je u sva ispitivanja za zajamčena mehanička svojstva. U tablici 4. prikazani su podaci za  $\sigma_{0,2}$  određeni eksperimentalno i izračunani po jednadžbama iz tablice 2. Usporedno su prikazani podaci iz literature (po normi, odnosno vrijednosti za koju jamče izabrani proizvođači). Kako se za žareno stanje prvi interval odnosi na područje plastičnosti koji obuhvaća tehničku granicu tečenja, proračun naprezanja za to granično stanje završen je po jednadžbama (9) i (12).

Rezultati za vlačnu čvrstoću ( $\sigma_v$ ) određeni su na temelju granične vrijednosti stabilne plastične deformacije.

Podatci u tablici 4. pokazuju da su određene granične vrijednosti naprezanja u potpunosti usklađene s podacima po normi. Izdvojeni postupak analitičkog određivanja granice elastičnosti i plastičnosti vrlo je pouzdan, budući da koeficijent korelacije ima visoke vrijednosti, a pogreška aproksimacije eksperimentalnih podataka s izdvojenim jednadžbama zapravo je u granicama pogreške mjerenja. Dobro poklapanje izmjerenih i izračunanih vrijednosti prikazuju podaci u tablici 3. i na slici 5.

Deformacijsko očvršćivanje u područjima između graničnih naprezanja (tablica 4.) pokazuje koliko je nužno kontinuirano povećavati naprezanje da se dostigne zadana deformacija, odnosno da materijal prijeđe iz jednog u drugo granično stanje. Vrijednosti očvršćivanja su različite za ispitane legure. Ipak je značajno evidentirati da u prvom intervalu, od tehničke granice elastičnosti do tehničke granice popuštanja, legure očvrstnu od 7 do 21 % u odnosu na naprezanje na tehničkoj granici elastičnosti, što je značajno povećanje u veoma ograničenom plastičnom području. U tablici 4. usporedno je prikazano očvršćivanje do granice 3,5 ‰, koja odgovara graničnoj plastičnoj deformaciji



Tablica 4. Podatci za modul elastičnosti i granična naprezanja ispitanih legura

| Legura  | Stanje | Izmjereno                | Izračunano | Podatci iz literature [23, 31-33] |     |                 |     |                    |     |
|---|--------|--------------------------|------------|-----------------------------------|-----|-----------------|-----|--------------------|-----|
|   |        | Modul elastičnosti [GPa] |            |                                   |     |                 |     |                    |     |
| AW-5083   | O, H   | -                        | -          | 71                                |     |                 |     |                    |     |
| AW-2024   | O, H   | -                        | -          | 73                                |     |                 |     |                    |     |
| Tehnička granica elastičnosti ( $\epsilon = 0,0001$ ) <sup>1)</sup> [MPa] |        |                          |            |                                   |     |                 |     |                    |     |
| AW-5083   | O      | -                        | 125,37     | -                                 |     |                 |     |                    |     |
|   | H      | -                        | 261,08     | -                                 |     |                 |     |                    |     |
| AW-2024   | O      | -                        | 70,32      | -                                 |     |                 |     |                    |     |
|   | H      | -                        | 227,58     | -                                 |     |                 |     |                    |     |
| Tehnička granica popuštanja ( $\epsilon = 0,002$ ) <sup>1)</sup> [MPa]    |        |                          |            |                                   |     |                 |     |                    |     |
| AW-5083   | O      | 134,72                   | 134,08     | min 125                           |     |                 |     |                    |     |
|   | H      | 290,64                   | 293,38     | min 250                           |     |                 |     |                    |     |
| AW-2024   | O      | 81,75                    | 84,68      | maks 96                           |     |                 |     |                    |     |
|   | H      | 253,39                   | 250,58     | -                                 |     |                 |     |                    |     |
| Vlačna čvrstoća <sup>1)</sup> [MPa]                                       |        |                          |            |                                   |     |                 |     |                    |     |
| AW-5083   | O      | 289,66                   | 286,62     | min 275                           |     |                 |     |                    |     |
|   | H      | 318,54                   | 317,98     | min 305                           |     |                 |     |                    |     |
| AW-2024   | O      | 222,94                   | 228,53     | maks 220                          |     |                 |     |                    |     |
|   | H      | 266,12                   | 265,96     | -                                 |     |                 |     |                    |     |
| Deformacijsko očvršćivanje u odnosu na tehničku granicu elastičnosti      |        |                          |            |                                   |     |                 |     |                    |     |
| Legura  | Stanje | do granice 0,2 %         |            | do granice 3,5 %                  |     | do granice 10 % |     | do vlačne čvrstoće |     |
|   |        | [MPa]                    | [%]        | [MPa]                             | [%] | [MPa]           | [%] | [MPa]              | [%] |
| AW-5083   | O      | 9                        | 7          | 11                                | 9   | 19              | 16  | 232                | 185 |
|   | H      | 33                       | 13         | 39                                | 15  | 52              | 20  | 73                 | 28  |
| AW-2024   | O      | 15                       | 21         | 23                                | 33  | 53              | 75  | 201                | 289 |
|   | H      | 23                       | 10         | 28                                | 12  | 37              | 16  | 45                 | 20  |

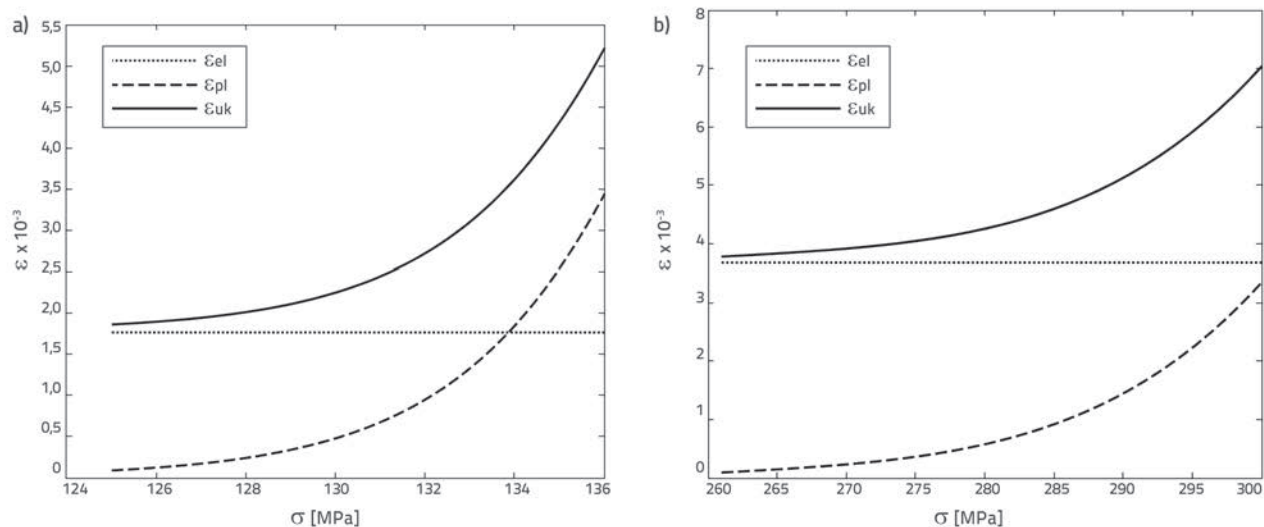
<sup>1)</sup> Granična naprezanja se određuju u odnosu na početnu površinu poprečnog presjeka i mogu se izračunati iz stvarnog naprezanja po obrascu  $\sigma/(1+\epsilon)$

Tablica 5. Ramberg-Osgoodove jednadžbe za ispitivane legure

| Legura  | Stanje | Jednadžba                                       | Broj | Područje naprezanja [MPa] | Udio deformacija $\frac{\% \epsilon_{el}}{\% \epsilon_{pl}}$ |                                 |
|---------|--------|---|------|---------------------------|--|---------------------------------|
|         |        |   |      |                           | Na tehničkoj granici elastičnosti                            | Na tehničkoj granici popuštanja |
| AW-5083 | O      | $\epsilon = 0,00177 + (0,00645\sigma)^{43,29}$  | (15) | < 139                     | 95/5   | 28/72                           |
|         |        | $\epsilon = 0,00177 + (0,00189\sigma)^{3,55}$   | (16) | 140-356                   |  |                                 |
|         | H      | $\epsilon = 0,00369 + (0,002669\sigma)^{25,25}$ | (17) | < 334                     | 97/3   | 61/39                           |
| AW-2024 | O      | $\epsilon = 0,00096 + (0,00799\sigma)^{15,95}$  | (18) | < 86                      | 95/5   | 19/81                           |
|         |        | $\epsilon = 0,00096 + (0,00237\sigma)^{3,74}$   | (19) | 86-274                    |  |                                 |
|         | H      | $\epsilon = 0,00313 + (0,00325\sigma)^{30,49}$  | (20) | < 272                     | 97/3   | 65/35                           |

betona i 10 %, koja odgovara oblasti Lüdersova produljenja običnih konstrukcijskih čelika (horizontalni dio dijagrama poslije dostizanja donje granice popuštanja). Očvršćivanje ispitanih legura za izdvojenu graničnu deformaciju betona u intervalu je od 9 % do 33 %, a za izdvojenu graničnu deformaciju čelika može dostići 71 % (u istom intervalu kod običnih konstrukcijskih čelika deformacijsko je očvršćivanje zanemarivo). Kontinuirano

deformacijsko očvršćivanje, koje prati djelovanje opterećenja, ima pozitivan učinak jer izaziva povećanje vrijednosti naprezanja u području vrlo ograničene plastične deformacije. Povećanje je posebice važno za područja između tehničke granice elastičnosti popuštanja, jer može sugerirati da će se eventualna plastična deformacija uslijed promjenjivog i/ili izvanrednog opterećenja manifestirati lokalno, povećati granična naprezanja legure



Slika 6. Ovisnost elastičnih, plastičnih i ukupnih deformacija o naprezanju za leguru AW-5083 u: a) žarenom stanju; b) deformiranom stanju

i faktore sigurnosti u intervalu do gore naznačenih iznosa deformacijskog očvršćivanja. Na temelju rezultata za tehničku granicu elastičnosti ( $\sigma_e$ ), modul elastičnosti ( $E$ ), koeficijent čvrstoće ( $K$ ) i indeks deformacijskog očvršćivanja ( $n$ ) izvedene su Ramberg-Osgoodove jednačbe za ispitane legure. Jednačbe su prikazane u tablici 5., usporedno s područjima napreznja za koje se mogu koristiti, kao i odnosom udjela elastične i plastične deformacije na tehničkoj granici elastičnosti i popuštanja. Na slici 6. prikazani su dijagrami promjene elastičnih, plastičnih i ukupnih deformacija u područjima do granice 3,5‰ za leguru AW-5083.

Vrijednosti svih koeficijenata u jednačbama su dovoljno različite pa je njihovu primjenu potrebno prilagoditi izabranoj leguri i stanju. Prvi član u jednačbama (15) do (20) predstavlja vrijednost elastične deformacije. Za konstantnu vrijednost napreznja, on se može programirati postupcima očvršćivanja legura budući da modul elastičnosti (kao fizikalna karakteristika materijala) zapravo ne ovisi o tim postupcima. Za usvojeno elastično područje do tehničke granice elastičnosti udio elastične deformacije je 95 do 97 %. Udio na tehničkoj granici popuštanja ovisi o početnom stanju: prethodnim deformacijskim očvršćivanjem legura on se zadržava na razini > 60 %, dok je kod žarenog (mekog) stanja znatno manji.

Kako vrijednosti koeficijenata u jednačbama ovisi o početnom stanju (svojstvima), njihove razlike se mogu očekivati uvijek kad uvjeti izmijene početna svojstva legura. To potvrđuju i eksperimentalna istraživanja deformacijskog ponašanja zavarenih spojeva od legure AW-5083 prikazana u [20]. Za osnovnu leguru dobivene su vrijednosti  $\sigma_{0,2} = 161$  MPa i  $n = 0,142$  ( $1/n \approx 7$ ). Razlika  $\sigma_{0,2}$  i  $1/n$  u odnosu na podatke u tablici 4 i jednačbi (15) može biti posljedica utjecaja mehaničke i termičke obrade, ali i postupka eksperimentalnog mjerenja. U skladu s tim može se promatrati i razlika za žareno stanje u odnosu na vrijednosti za  $1/n = 10-20$  kod neočvrstnutih legura preporučenih u radu [13] (podatci su dobiveni na temelju

obrazaca danih u EN 1999-1-1). U istom radu, kao i radu [34], za očvrstnute legure preporučena je vrijednost  $1/n = 20-40$ . Iako koeficijenti u jednačbama (17) i (20) odgovaraju preporuci, intervali za ove dvije grupe legura dovoljno su široki da se mogu koristiti samo kao informacijski podatak. S obzirom na važnost jednačbi, opravdan je opisani postupak egzaktne analitičke obrade i određivanja graničnih napreznja, koeficijenata čvrstoće i indeksa deformacijskog očvršćivanja na osnovi Hollomonove jednačbe.

#### 4. Zaključak

Ispitivanja prikazana u radu usmjerena su na istraživanje deformacijskog ponašanja aluminijskih legura pod djelovanjem vlačnih napreznja. Početne eksperimentalne krivulje dobivene su vlačnim ispitivanjem standardnih uzoraka od lima za legure AW-5083 i AW-2024. U analizi dobivenih eksperimentalnih rezultata objašnjene su karakteristične promjene, izvršena analitička obrada i izvedene potrebne jednačbe za opis deformacijskih karakteristika.

Na temelju dobivenih rezultata i analize potvrđeno je da se deformacijsko očvršćivanje ispitanih legura pouzdano može aproksimirati Hollomonovom jednačbom. Pri tome se za žarena stanja precizno identificiraju dva područja očvršćivanja. Ovakvo razdvajanje područja je važno zato što prvo područje sadrži tehničke granice elastičnosti i popuštanja, koje se primjenjuju za određivanje nosivosti konstrukcija.

Prikazani analitički opis deformacijskih promjena omogućio je izvođenje Ramberg-Osgoodovih jednačbi koje su dosljedno povezale elastično i plastično područje na temelju njihove egzaktne povezanosti s karakteristikama deformacijskog očvršćivanja za ispitane legure i stanja. Visoki koeficijenti korelacije za izvedene analitičke ovisnosti i jednostavna procedura sugeriraju da se ovaj postupak može primijeniti za istraživanja i kod ostalih aluminijskih legura.

## Zahvala

Rad sadrži dio rezultata dobivenih na projektu "Istraživanje rešetkastih stubova od AL legura za prenos električne

energije-IRSALPEE" koji se realizira uz finansijsku potporu Ministarstva nauke Crne Gore, kao i potporu Građevinskog fakulteta i Metalurško-tehnološkog fakulteta Univeziteta Crne Gore.

## LITERATURA

- [1] Dwight, J.: Aluminium Design and Construction, Taylor & Francis Group, 1999., <http://dx.doi.org/10.4324/9780203028193>
- [2] Kissell, J.R., Ferry, R.L.: Aluminium Structures - A Guide to Their Specifications and Design, Second Edition, John Wiley & Sons, 2002, pp. 337-423.
- [3] Mazzolani, F.M.: Design Criteria for Aluminium structures: Technology, Codification and Application, Aluminium Structural Design, University of Naples "Federico II, No. 443, Springer, 2003, pp. 1-88, [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-2794-0\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-2794-0_1)
- [4] Lundberg, S.: Examples of Aluminium Applications in Various Environments Including Marine, Hydro Aluminum Profiler, 2011, pp. 3-20,.
- [5] Aluminum Association (1998): Aluminum Alloy Selection and Applications, [www.calm-aluminium.com.au/documents/aluminium-alloys.pdf](http://www.calm-aluminium.com.au/documents/aluminium-alloys.pdf).
- [6] <http://skyscrapercenter.com/building/tornado-tower/1677>
- [7] [http://www.china-xiyi.com/product\\_index.php](http://www.china-xiyi.com/product_index.php).
- [8] Aluminum structural framing - building inspiration, Bosch Rexroth Corporation, 2009.
- [9] Efthymiou, E., Cöcen, Ö.N, Ermolli, R.S.: Sustainable Aluminium Systems, Sustainability, 2010 (2), pp. 3100-3109, <http://dx.doi.org/10.3390/su2093100>
- [10] Skejić, D., Boko, I., Torić, N.: Aluminium as a material for modern structures, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 11, pp. 1075-1085, doi: 10.14256/JCE.1395.2015
- [11] Vukašinović, V., Negevaska-Cvetanovska, G., Kozinakov, D.: Uopredna analitička studija konstruktivnih elemenata od aluminijских legura i čelika, Materijali i konstrukcije, 49 (2006) 1-2, pp. 25-33.
- [12] Höglund, T.: TALAT Lecture 2301, Design of Members, Advanced Level, Royal Institute of Technology, Stockholm, EAA – European Aluminium Association, 2009, pp.19-30.
- [13] Gabauer, W.: The determination of Uncertainties of Ramberg-Osgood Parameters (From a Tensile Test), Woest-Alpine Stahl Linz GmbH, Issue 1, September 2000, pp. 1-16.
- [14] Saga, M., Vaško, M., Malcho, M., Jadnačka, J.: Computational approach proposition for further processing of the fatigue curve, Applied and Computational Mechanics, 1 (2007), pp. 265-272.
- [15] Höglund, T., Tindal, Ph., UK Designers' Guide to Eurocode 9: Design of Aluminium Structures EN 1999-1-1 and -1-4, Annex E – analytical models for stress-strain relationship, The Institution of Civil Engineers (ICE) Publishing, Thomas Telford Limited, 2012, pp. 168-172.
- [16] Su M.N., Young, B., Gardner, L.: Continuous Strength Method for Aluminium Alloy Structures, Advanced Materials Research, Vol. 742, Aug. 2013, pp. 70-75, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.742.70>
- [17] Wei, D., Elgindi, M.B.M.: Finite Element Analysis of the Ramberg-Osgood Bar, American Journal of Computational Mathematics, 2013, 3, pp. 211-216, <http://dx.doi.org/10.4236/ajcm.2013.33030>
- [18] Maljaars, J., Soetnes, F., Katgerman, L.: Constitutive Model for Aluminum Alloys Exposed to Fire Conditions, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 39A, April 2008, pp. 778-789, <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-008-9470-0>
- [19] Dokšanović, T., Markulak, D., Džeba, I.: State of the art review of the stability and welding of aluminium alloy elements, GRAĐEVINAR, 66 (2014) 2, pp. 115-125, doi: 10.14256/JCE.932.2013
- [20] Morgenstern, C.: Kerbgrundkonzepte für die schwingfeste Auslegung von Aluminiumschweißverbindungen am Beispiel der naturharten Legierung AlMg4,5Mn (AW-5083) und der warmausgehärteten Legierung AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6), Dissertation, Vom Fachbereich Maschinenbau an der Technische Universität Darmstadt, 2006, pp. 41-114.
- [21] Wilson, C., Quillen, E.: Comparison of Elastic-Plastic Surface Crack Solutions, ASTM Workshop, Norfolk, May 23, 2008, [www.astm.org/IMAGES03/E08Presentation\\_5.ppt](http://www.astm.org/IMAGES03/E08Presentation_5.ppt)
- [22] Fourcade, T., Dalverny, O., Alexis, J., Seguineau, C., Desmarres, J.M.: Parametric identification of elastic-plastic constitutive laws using spherical indentation, <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
- [23] [www.millproducts-alcoa.com](http://www.millproducts-alcoa.com), ALCOA Mill Products, Alloy 2024 Sheet and Plate.
- [24] Benedyk, J.C.: International Temper Designation System for Wrought Aluminium Alloys: Part I-Strain Hardenable (H Temper) Aluminum Alloys, Light Metal Age, October 2009, pp. 26-30.
- [25] Benedyk, J.C.: International Temper Designation System for Wrought Aluminium Alloys: Part II-Thermally Treated (T Temper) Aluminum Alloys, Light Metal Age, August 2010, pp.16-22.
- [26] European Standards 10002-1, July 2001, Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of Test at ambient temperature, Annex B, CEN 2001.
- [27] Radović, Lj.: Deformacijsko ponašanje i karakteristike loma Al-Mg legura u svetlu međuzavisnosti sastav-tehnologija-struktura, Doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka Čačak, 2013, pp. 34-43.
- [28] Hensel, A., Spittel, T.: Krafte und Arbeitsbedarf Bildsamer Formgebungverfahren, Deutscher Verlag Fur Grundstoff Industrie, Leipzig, 1978.
- [29] Introduction the new STATEGRAPHICS CENTURION, <http://www.statgraphics.com/download-trial>
- [30] Ashby, M., Jones, D.: Engineering Materials I, Third Edition, ELSEVIER Butterworth Heinemann, pp. 32-42.
- [31] EN 1999-1-1 (2007): Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules, European Committee for Standardization, 2009.
- [32] ASTM B209 – 07: Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate, American Society for Testing and Materials, 2007.
- [33] ASM Handbook, 10<sup>th</sup> Edition, Volume 2: Properties & Selection - Nonferrous Alloys & Special-Purpose Materials, Materials Park, Ohio, 1990.
- [34] Landolfo, R.: Cold-Formed Structures, Eurocode 9 –Part 1.4, Brussels, 2008, Dissemination of information workshop. [http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/EN1999\\_8\\_Landolfo.pdf](http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/EN1999_8_Landolfo.pdf)