

## *Predgovor*

Svakodnevno povećanje zahteva za proizvodnjom i upotrebom najrazličitijih proizvoda od aluminijuma i aluminijumskih legura, doprineli su da, od početka komercijalne proizvodnje (1886. god.) do danas (2010. god.), aluminijum postane metal čija je ukupna proizvodnja veća od proizvodnje svih ostalih obojenih metala (Cu, Pb, Sn, itd.), i drugi metal po obimu proizvodnje, odmah iza čelika. Zahvaljujući jedinstvenoj kombinaciji svojstava, kao što su: električna i toplotna provodljivost, mala specifična težina, čvrstoća, otpornost prema koroziji, sposobnost oblikovanja i prerade deformacijom, zavarljivost i mogućnost 100% recikliranja, aluminijum je postao nezamenljiv u industriji transportnih sredstava (drumska i šinska vozila, cisterne, automobilska i avio industrija, brodogradnja, itd.), u industriji ambalaže i pakovanja, medicini i farmaceutskoj industriji, građevinarstvu, elektronskoj industriji, u proizvodnji grejnih tela, dalekovoda, izolatora, pribora u domaćinstvu, itd. Primenom Al i Al-legura u industriji transportnih sredstava težina konstrukcije se smanjuje, pri čemu, svakih 10% smanjenja težine doprinosi smanjenju potrošnje goriva za 8%. U isto vreme, svaki kilogram ugrađenog Al ili Al-legure, ima potencijal da smanji emisiju CO<sub>2</sub>, i to za oko 20-45 kg CO<sub>2</sub> u radnom veku prevoznog sredstva.

Od svih Al-legura koje se danas koriste, legure Al-Mg sistema imaju najpovoljniju kombinaciju svojstava (visoka vrednost odnosa čvrstoće i specifične težine, duktilnost/sposobnost oblikovanja, koroziona otpornost i zavarljivost), što omogućava njihovu široku primenu, i u isto vreme predstavlja motiv za njihovo intenzivno proučavanje u mnogim svetskim laboratorijama i istraživačkim centrima.

U monografiji *"Aluminijum-magnezijum legure: struktura, svojstva i deformacija"* prikazani su najvažniji rezultati višegodišnjih istraživanja na Katedri za metalurško inženjerstvo, Tehnološko metalurškog fakulteta u Beogradu, koja se odnose na proučavanje strukture, svojstava, deformacionog ponašanja, korozivnih karakteristika, sposobnosti oblikovanja i mogućnosti rafinacije strukture u Al-Mg legurama različitog hemijskog sastava.

U pet poglavlja ove monografije: *Uvod, Aluminijumske legure, Struktura i deformacija Al-Mg legura, Koroziono ponašanje Al-Mg legura i Rafinacija strukture Al-Mg legura ECAP presovanjem*, detaljno se analiziraju najvažnije karakteristike Al-Mg legura za deformaciju, počev od strukture, uslova termomehaničke prerade i promena u strukturi, koje nastaju pri zagrevanju i u toku deformacije na povišenim temperaturama, najvažnijih mehanizama ojačavanja, deformacionih karakteristika, zatim, problem površinske morfologije, odnosno

pojave traka plastičnog i diskontinuiranog popuštanja na površini limova u toku oblikovanja, kao i korozionog ponašanja Al-Mg legura sa povećanim sadržajem Mg. Imajući u vidu da je veliki broj istraživanja u svetu posvećen rafinaciji strukture, koja obezbeđuje superplastično oblikovanje Al-legura na povišenim temperaturama, jedan deo monografije sadrži rezultate proučavanja mogućnosti postizanja submikronske i nano strukture u Al-Mg legurama. Rezultati prikazani u poglavlju *Rafinacija strukture Al-Mg legura ECAP presovanjem*, nastali su tokom jednogodišnjeg post-doktorskog usavršavanja autora na Katoličkom Univerzitetu u Leuvenu, Belgija, na Katedri za inženjerstvo materijala i metalurgiju, i rezultat su rada na projektu *Razvoj mikrostrukture i mehanička svojstva legura AA5182 i AA5182+1.2% Cu posle deformacije ECAP presovanjem*. Takođe, monografija sadrži jedan deo rezultata magistarske i doktorske teze autora, kao i rada na projektima TR 6753B, TR 19051 i E!4569, koje je finansiralo Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije. Realizaciju ovih projekata finansijski je pomogla i Valjaonica aluminijuma Impol-Seval iz Sevojna, koja je ujedno obezbedila materijal za ispitivanja.

Ovom prilikom autor izražava veliku zahvalnost mentoru i recenzentu Dr Endreu Romhanjiju, redovnom profesoru TMF-a u Beogradu, na višegodišnjoj uspešnoj saradnji, recenzentu i uredniku Dr Milanu T. Jovanoviću, naučnom savetniku INN Vinča u Beogradu, na korisnim savetima, i izdavaču Dr Željku Kamberoviću, vanrednom profesoru TMF-a i predsedniku Saveza inženjera metalurgije Srbije. Veliku zahvalnost autor duguje Prof. Dr Bertu Verlindenu, sa Katedre za inženjerstvo materijala i metalurgiju (MTM, KU Leuven, Belgija), koji je ličnim angažovanjem obezbedio stipendiju za jednogodišnje post-doktorsko usavršavanje, na jednom od najcenjenijih i najstarijih Univerziteta u Evropi (osnovan 1425. god.).

Takođe, autor se zahvaljuje svim kolegama sa Katedre za metalurško inženjerstvo na Tehnološko metalurškom fakultetu u Beogradu, iz Vojno-tehničkog instituta u Žarkovu, sa Tehničkog fakulteta u Čačku, iz Valjaonice aluminijuma Impol-Seval u Sevojnu, i svim ostalim kolegama koji su učestvovali i saradivali na projektima čiji su rezultati omogućili nastajanje ove monografije.

Beograd, 2010. god.

*Autor*

# SADRŽAJ

Uvod .....	1
1. Aluminijumske legure .....	9
1.1 Klasifikacija Al-legura .....	9
1.1.1 Al-legure za livenje .....	10
1.1.2 Al-legure za deformaciju .....	11
1.2 Oznaka stanja Al-legura .....	15
1.3 Svojstva i primena Al-legura za deformaciju .....	17
1.3.1 Serija 1xxx – čist Al i Al-Fe legure .....	18
1.3.2 Serija 2xxx – Al-Cu legure .....	18
1.3.3 Serija 3xxx – Al-Mn legure .....	19
1.3.4 Serija 4xxx – Al-Si legure .....	19
1.3.5 Serija 5xxx – Al-Mg legure .....	19
1.3.6 Serija 6xxx – Al-Mg-Si legure .....	20
1.3.7 Serija 7xxx – Al-Zn-Mg legure .....	20
1.3.8 Serija 8xxx – Al-Fe-Ni i Al-Li legure .....	21
2. Struktura i deformacija Al-Mg legura .....	23
2.1 Hemijski sastav komercijalnih Al-Mg legura .....	25
2.2 Dizajniranje novih Al-Mg legura .....	26
2.3 Termomehanička prerada Al-Mg legura .....	28
2.3.1 Konvencionalni način termomehaničke prerade .....	28
2.3.2 Savremeni postupci termomehaničke prerade .....	30
2.4 Mikrostrukturne promene u toku termomehaničke prerade .....	34
2.4.1 Razvoj mikrostrukture u toku livenja i homogenizacije .....	34
2.4.2 Identifikacija faza .....	37
2.4.3 Struktura i substruktura deformisanih Al-Mg legura .....	39
2.4.4 Mikrostrukturne promene u toku žarenja Al-Mg legura .....	44
2.4.4.1 Oporavljanje .....	44
2.4.4.2 Rekristalizacija .....	48
2.5 Uticaj termomehaničke prerade na svojstva Al-Mg legura .....	53
2.5.1 Električni otpor .....	54
2.5.2 Čvrstoća .....	60
2.5.3 Izražena granica popuštanja i Lüders-ovo izduženje .....	63
2.5.4 Pojava Lüders-ovih traka i traka diskontinuiranog popuštanja .....	68
2.5.5 Sposobnost oblikovanja .....	74

3. Koroziono ponašanje Al-Mg legura .....	81
3.1 Vrste korozije .....	81
3.1.1 Intergranularna korozija .....	81
3.1.2 Raslojavajuća korozija .....	82
3.1.3 Naponska korozija .....	84
3.1.3.1 Mehanizmi naponske korozije .....	85
3.2 Testovi za određivanje osetljivosti prema koroziji .....	87
3.3 Faktori koji utiču na koroziono ponašanje Al-Mg legura .....	91
3.3.1 Hemijski sastav .....	91
3.3.2 Struktura .....	94
3.4 Pобоljšanje otpora prema koroziji Al-Mg legura .....	96
3.4.1 Dodatak zinka .....	96
3.4.2 Platanje .....	97
3.4.3 Kontrola mikrostrukture .....	97
4. Rafinacija strukture Al-Mg legura ECAP presovanjem .....	105
4.1 Karakteristike ECAP presovanja .....	105
4.2 Razvoj mikrostrukture u toku ECAP presovanja .....	113
4.3 Mehanička svojstva Al-Mg legura posle ECAP presovanja .....	120
Literatura .....	125