

BORIS G. MINOV  
MILJANA M. POPOVIĆ  
DRAGOMIR M. GLIŠIĆ  
ENDRE L. ROMHANJI

Tehnološko metalurški fakultet,  
Univerzitet u Beogradu, Katedra  
za metalurško inženjerstvo,  
Beograd

NAUČNI RAD

669.71'721-034:54.02:621.7.011

## UTICAJ STRUKTURE NA SPOSOBNOST OBLIKOVANJA AL-MG6,8 LEGURE\*

*U ovom radu korišćena je aluminijum–magnezijum legura sa 6,8% magnezijuma (Al–Mg6,8), koja pripada grupi Al–Mg legura visoke čvrstoće. Ispitivan je uticaj mikrostrukture, koja se postiže primenom različitih uslova termomehantičke obrade (TMO), na deformativno ponašanje pri jednoosnom zatezanju, i na sposobnost oblikovanja u uslovima složenog naponsko–deformisanog stanja. Najbolju sposobnost oblikovanja, koja je ocenjena na osnovu parametara ojačavanja u toku jednoosnog zatezanja, i na osnovu graničnih krivih oblikovanja (GKO), konstruisanih po kriterijumu lokalnog stanjivanja i granične visine kupole (GVK), pokazuje ispitivana legura sa rekristalisanom jednofaznom  $\alpha$ -Al i/ili dvofaznom ( $\alpha + \beta$ ) strukturom.*

Legure Al–Mg imaju široku oblast primene, pogotovo u izradi transportnih sredstava, automobilskoj industriji i brodogradnji, zbog niza pogodnih osobina kao što su dobra koroziona otpornost, odlična zavarljivost, povoljan odnos između čvrstoće i specifične težine, i dobra sposobnost oblikovanja za dati nivo čvrstoće [1,2]. Ove legure čine važnu grupu Al–legura, u kojima je Mg osnovni legirajući element, i koje ne ojačavaju termičkim taloženjem. Osnovni mehanizmi ojačavanja Al–Mg legura za deformaciju su rastvarajuće ojačavanje i ojačavanje deformacijom. Povećanju čvrstoće doprinose i sekundarne faze na bazi Mn, Cr, Zr, itd., a kod Al–Mg legura u žarenom stanju, veličina zrna takođe utiče na čvrstoću [1–3].

Struktura i osobine Al–Mg legura zavise od uslova termo mehaničke prerade (TMP), koja obuhvata proces livenja, homogenizacionog žarenja i topljenje valjanja (primarna prerada) i proces hladnog valjanja i završnog žarenja (završna prerada). Pošto su Al–Mg legure uglavnom namenjene za oblikovanje, jedan od osnovnih zahteva za njihovu primenu je optimizacija uslova TMP, koji obezbeđuju dobru sposobnost oblikovanja, uz zadržavanje ili povećanje pokazatelja čvrstoće, pre svega, granice popuštanja [4–8].

Poznato je da stepen rastvarajućeg ojačavanja Al–Mg legura raste sa povećanjem sadržaja supstitucijski rastvorenih atoma Mg u čvrstom rastvoru [2,3]. U Al–Mg legurama koje sadrže više od 3% Mg, sadržaj Mg u čvrstom rastvoru može biti veći od ravnotežnog, tako da se na sobnoj temperaturi obrazuje

presićeni čvrsti rastvor Mg u  $\alpha$ -Al, ili se jedan deo Mg izdvaja u obliku ravnotežne  $\beta$ -faze ( $Mg_5Al_8$  faza). Povećanje sadržaja Mg u Al–Mg legurama je poželjno, jer doprinosi povećanju čvrstoće i poboljšanju sposobnosti oblikovanja, ali, u isto vreme dovodi do smanjenja otpora prema koroziji, naročito kod Al–Mg legura sa više od 5% Mg, u kojima se jedan deo Mg izdvaja u obliku  $\beta$ -faze [9–11].

Zbog toga je za proučavanje u ovom radu odabrana Al–Mg legura sa povećanim sadržajem Mg (6,8% Mg), koja pripada Al–Mg legurama visoke čvrstoće. Cilj rada je bio da se ispita uticaj različitih uslova termomehantičke obrade (TMO) na razvoj strukture i na sposobnost oblikovanja, koja je ocenjena na osnovu parametara ojačavanja dobijenih u toku jednoosnog zatezanja, i na osnovu graničnih krivih oblikovanja, koje su dobijene pri dvoosnom razvlačenju.

### EKSPERIMENTALNI DEO

Za ispitivanje je korišćena Al–Mg legura, koja je proizvedena u industrijskim uslovima u Valjaonici aluminijuma Impol – Seval u Sevojnu. Hemijski sastav ispitivane legure dat je u tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivane Al–Mg legure (mas%)  
Table 1. Chemical composition of tested Al–Mg alloy (wt%)

Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Al
6,8	0,5	0,2	0,1	0,03	0,05	ost.

Al–Mg limovi dalje su hladno valjani u laboratorijskim uslovima, sa stepenom redukcije,  $r = 50\%$ , i žareni na temperaturi 265, 285 i 320 °C, u trajanju od 3 h. Na taj način, pripremljene su tri serije uzoraka za ispitivanje: serija A (265 °C/3 h), serija B (285 °C/3 h) i serija C (320 °C/3 h).

Za praćenje mikrostrukturnih promena u toku žarenja na 265, 285 i 320 °C, korišćena su metalografska ispitivanja i metoda merenja električne provo-

\*Rad saopšten na skupu "Šesti seminar mladih istraživača", Beograd, 24.–26. decembar 2007.

Adresa autora: B. Minov, Peđe Milosavljevića 42/16, 11077 Beograd, Srbija

E-mail: boris\_minov@yahoo.com

Rad primljen: Decembar 24, 2007.

Rad prihvaćen: Januar 22, 2008.

dljivosti,  $\chi$ , odnosno električne otpornosti,  $\rho$ . Uzorci za metalografska ispitivanja pripremljeni su postupkom mehaničkog i elektrohemijskog poliranja, i na-grizanja Barkers-ovim reagensom. Za merenje električnog otpora korišćen je uređaj "Sigma Test D 2.068". Merenja su izvršena na uzorcima ispitivane legure u deformisanom i žarenom stanju, na sobnoj temperaturi,  $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sa frekvencijom  $f = 240\text{ kHz}$ .

Ispitivanje jednoosnim zatezanjem izvršeno je na mehaničkoj "Schenk" kidalici. Za ispitivanje su korišćene standardne ASTM epruvete, sa mernom dužinom,  $l_0 = 25\text{ mm}$  i širinom mernog dela epruvete,  $b_0 = 6,25\text{ mm}$ , koje su isečene tako da je osa zatezanja paralelna pravcu valjanja. Ispitivanja su izvedena na sobnoj temperaturi, sa brzinom zatezanja  $v_1 = 1\text{ mm/min}$  ( $\dot{\varepsilon} = 6,7 \cdot 10^{-4}/\text{s}$ ) i  $v_2 = 10\text{ mm/min}$  ( $\dot{\varepsilon} = 6,7 \cdot 10^{-3}/\text{s}$ ).

Za analizu deformacionog ponašanja ispitivane legure pri jednoosnom zatezanju, konstruisane su stvarne krive ojačavanja ( $\sigma - \varepsilon$ ), koje su dobijene fitovanjem eksperimentalno dobijenih  $\sigma - \varepsilon$  zavisnosti, odgovarajućim polinomom. Na osnovu tako dobijene funkcije, koja opisuje  $\sigma - \varepsilon$  zavisnost, izračunate su vrednosti brzine deformacionog ojačavanja ( $d\sigma/d\varepsilon$ ), kao i indeksa deformacionog ojačavanja ( $n$ ). Za izračunavanje faktora osetljivosti na brzinu deformacije,  $m$ , korišćen je sledeći izraz:

$$m = \frac{\ln(\sigma_1/\sigma_2)}{\ln(\dot{\varepsilon}_1/\dot{\varepsilon}_2)} \quad (1)$$

gde su:  $\dot{\varepsilon}_1$  i  $\dot{\varepsilon}_2$  – stvarne brzine deformacije u toku jednoosnog zatezanja, a  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  – vrednosti stvarnog naprezanja za odgovarajuću brzinu deformacije  $\dot{\varepsilon}_1$  i  $\dot{\varepsilon}_2$ , respektivno, i za dati stepen deformacije  $\varepsilon = \text{const}$ .

Za ispitivanje sposobnosti oblikovanja razvlačenjem po tehnici Hecker-a [12], korišćeni su uzorci dimenzija  $35 \times 150\text{ mm}$ ,  $50 \times 150\text{ mm}$ ,  $85 \times 150\text{ mm}$ ,  $95 \times 150\text{ mm}$  i  $150 \times 150\text{ mm}$ . Na svakom od uzoraka, izvršeno je elektrohemijsko nanošenje mreže, koja se sastoji od krugova prečnika  $2\text{ mm}$ . Ispitivanje razvlačenjem je urađeno na "Hille" presi, sa alatom koji se sastoji od pritisne ploče, matrice i sferičnog trna prečnika  $75\text{ mm}$ . Razvlačenje uzoraka izvršeno je na sobnoj temperaturi, sa brzinom kretanja trna  $26\text{ mm/min}$ , bez podmazivanja. U toku testa, pomoću pisača se registruje sila razvlačenja i visina kupole, pri čemu se na kraju testa dobija kriva koja pokazuje zavisnost putanje kretanja trna od sile razvlačenja. Razvlačenje uzoraka izvodi se do pojave loma, a visina kupole očitava se sa krive dobijene na pisaču i to na mestu dostizanja maksimalne sile pri razvlačenju.

Na osnovu dužine najveće,  $d_1$ , i najmanje,  $d_2$ , ose elipse, koje nastaju deformacijom krugova prilikom razvlačenja, izračunavaju se najveća,  $e_1$ , i najmanja,  $e_2$ , granična deformacija, korišćenjem sledećih izraza:

$$e_1 = \frac{d_1 - d}{d} \times 100, [\%] \quad (2)$$

$$e_2 = \frac{d_2 - d}{d} \times 100, [\%]$$

gde je  $d$  – prečnik nedeformisanog kruga.

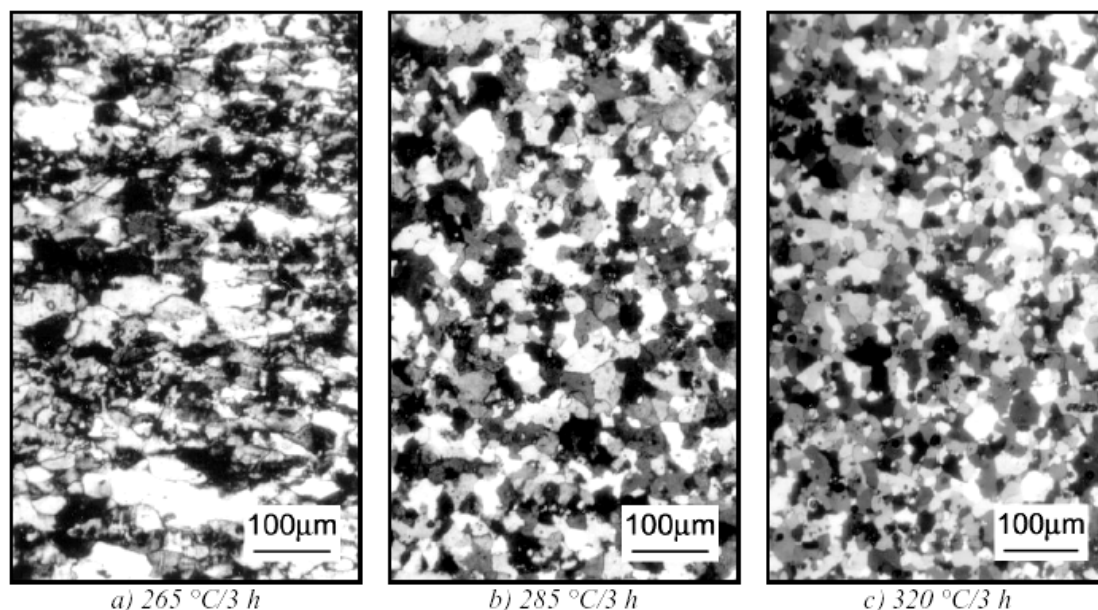
Naime, posle razvlačenja uzoraka na presi, izmerene su dimenzije osa  $d_1$  i  $d_2$  za tri vrste elipse: 1) polomljene elipse (lom prolazi kroz elipse), 2) elipse na mestu pojave "vrata" (na kojima se javlja stanjenje lima po debljini, ali nema preloma) ili elipse koje tangiraju liniju loma, i 3) elipse izvan oblasti loma ili "vrata", ali u njihovoj neposrednoj blizini (sigurna oblast). Za svaki uzorak, na osnovu većeg broja merenja, izračunava se srednja vrednost najveće  $e_1$  i najmanje glavne deformacije  $e_2$ , za područje loma (L), zone lokalnog stanjivanja (L.S.) i sigurnu oblast (S.O.). Prilikom konstruisanja granične krive oblikovanja (GKO) na bazi graničnih deformacija, na apscisu se nanose vrednosti najmanje glavne deformacije,  $e_2$ , a na ordinatu vrednosti najveće glavne deformacije,  $e_1$ . Granična kriva oblikovanja (GKO), definisana po kriterijumu lokalnog stanjivanja, konstruisana je na dijagramu zavisnosti  $e_1 - e_2$  povlačenjem linije neposredno ispod tačaka koje odgovaraju deformacijama u zoni lokalnog stanjivanja (L.S.), a iznad tačaka za sigurnu oblast (S.O.).

Granična visina kupole (GVK) predstavlja vrednost visine kupole svakog uzorka koja se dostiže pri maksimalnom opterećenju na presi. Za konstruisanje granične krive oblikovanja po kriterijumu GVK, na apscisu se nanose vrednosti najmanje glavne deformacije,  $e_2$  u oblasti lokalnog stanjivanja (L.S.) za dati uzorak, a na ordinatu se nanose vrednosti granične visine kupole, koje su normalizovane sa poluprečnikom trna (GVK/pT, pT =  $37,5\text{ mm}$ ).

## REZULTATI

Na slici 1 (a-c) prikazana je mikrostruktura ispitivane AlMg6,8 legure posle 50% deformacije hladnim valjanjem, i žarenja na  $265$ ,  $285$  i  $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mikrofotografija na slici 1a pokazuje da u strukturi nije došlo do rekristalizacije posle žarenja na  $265\text{ }^{\circ}\text{C}$ , u trajanju od  $3\text{ h}$ . Žarenjem na  $285$  i  $320\text{ }^{\circ}\text{C}$  obrazovana je rekristalisana struktura (slika 1b-c).

Zavisnost električnog otpora ispitivane legure od uslova termomehaničke obrade (TMO) prikazana je na slici 2. Rezultati pokazuju da električni otpor ispitivane legure u deformisanom stanju opada posle žarenja na  $265\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sa povišenjem temperature žarenja do  $285\text{ }^{\circ}\text{C}$ , električni otpor raste, i posle žarenja na  $320\text{ }^{\circ}\text{C}$  dostiže maksimalnu vrednost, koja je približno jednaka vrednosti električnog otpora ispitivane legure u polaznom deformisanom stanju. Naime, porast električnog otpora ukazuje na povećanje sadržaja rastvorenih atoma Mg u čvrstom rastvoru Al,

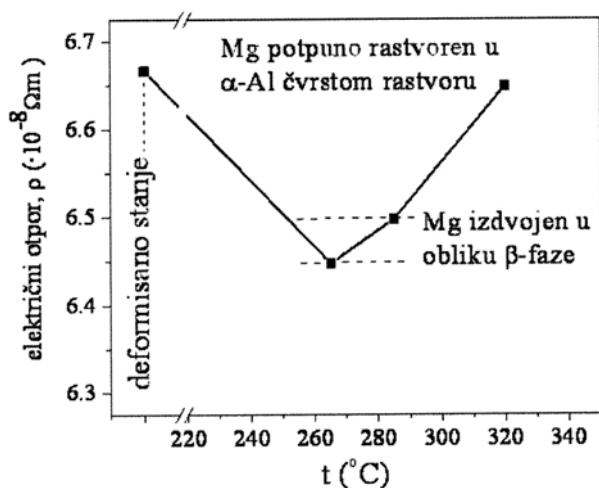


a) 265 °C/3 h

b) 285 °C/3 h

c) 320 °C/3 h

Slika 1. Mikrofotografije strukture ispitivane AlMg6,8 legure posle termomehničke obrade  
 Figure 1. Microstructures of tested AlMg6.8 alloy after different thermo mechanical treatments



Slika 2. Zavisnost električnog otpora ispitivane legure od temperature žarenja

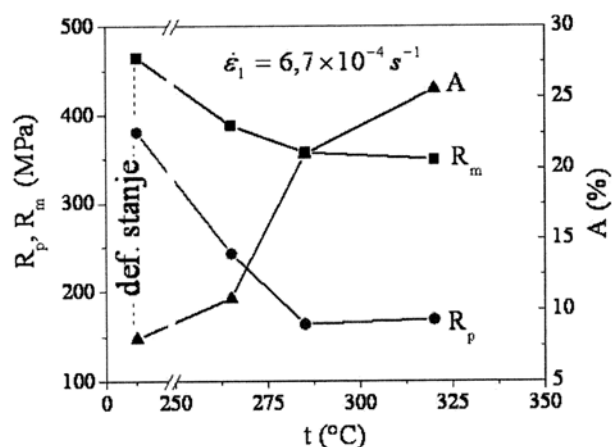
Figure 2. The effect of annealing conditions on the electrical resistivity

dok smanjenje vrednosti električnog otpora odgovara izdvajanju rastvorenih atoma Mg iz čvrstog rastvora u obliku čestica β-faze ( $Mg_5Al_8$ ), što je poznato iz prethodnih istraživanja [2,11].

Na slici 3 prikazan je uticaj temperature žarenja na granicu popuštanja,  $R_p$ , zateznu čvrstoću,  $R_m$  i ukupno izduženje,  $A$ , pri jednoosnom zatezanju ispitivane legure, sa brzinom deformacije  $\dot{\epsilon}_1$ .

Rezultati pokazuju da čvrstoća,  $R_p$  i  $R_m$ , ispitivane legure opada, a ukupno izduženje,  $A$ , raste posle žarenja u temperaturnom intervalu od 265 do 320 °C.

Na slici 4 prikazan je uticaj temperature žarenja ispitivane legure na nivo stvarnog napreznja u toku



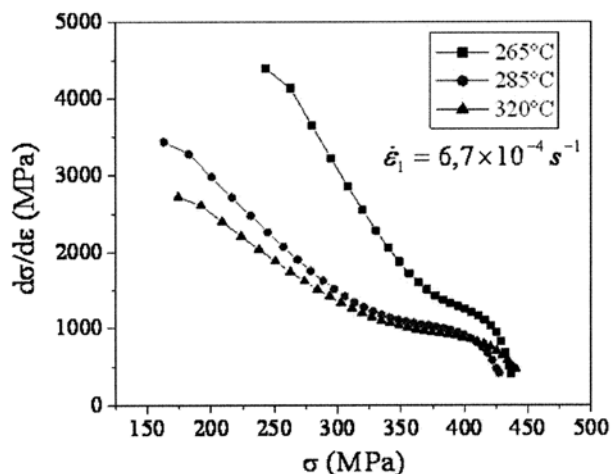
Slika 3. Uticaj temperature žarenja na mehaničke osobine u toku jednoosnog zatezanja

Figure 3. Variations of tensile properties with different annealing conditions

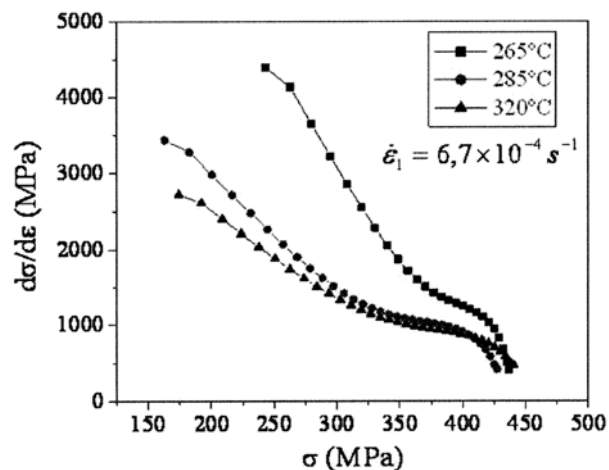
jednoosnog zatezanja, pri brzini deformacije  $\dot{\epsilon}_1$ . Rezultati pokazuju da nivo stvarne krive ojačavanja opada sa povišenjem temperature žarenja ispitivanih uzoraka, od 265 do 320 °C.

Na slici 5 prikazana je zavisnost brzine deformacionog ojačavanja,  $d\sigma/d\epsilon$ , od stvarnog napreznja,  $\sigma$ , u toku jednoosnog zatezanja ispitivanih uzoraka, pri brzini deformacije  $\dot{\epsilon}_1$ .

Pokazano je da se najveća vrednost brzine deformacionog ojačavanja dobija kod uzoraka žarenih na 265 °C. Međutim, u toku deformacije, brzina deformacionog ojačavanja opada, za sve tri serije uzoraka, pri čemu je intenzitet kojim se smanjuje brzina deformacionog ojačavanja najveći kod uzoraka žarenih na 265 °C.



Slika 4. Uticaj temperature žarenja na nivo stvarnog napreznja u toku jednoosnog zatezanja  
Figure 4. The effect of annealing conditions on the true stress-strain curves level in tensile testing

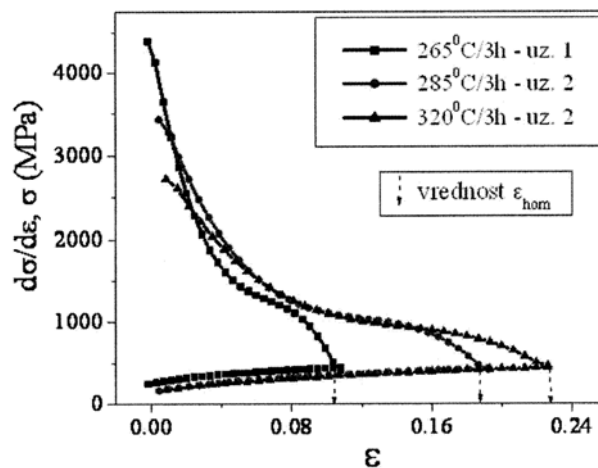


Slika 5. Zavisnost brzine deformacionog ojačavanja,  $d\sigma/d\varepsilon$ , od stvarnog napreznja,  $\sigma$ , u toku jednoosnog zatezanja.  
Figure 5. Strain hardening rate,  $d\sigma/d\varepsilon$ , variation with true stress,  $\sigma$ , in tensile testing.

Zavisnost brzine deformacionog ojačavanja,  $d\sigma/d\varepsilon$ , i stvarnog napreznja,  $\sigma$ , od stvarne deformacije,  $\varepsilon$ , u toku jednoosnog zatezanja, prikazana je na slici 6.

Vrednost stvarne deformacije,  $\varepsilon$ , koja odgovara preseku krivih  $d\sigma/d\varepsilon - \varepsilon$  i  $\sigma - \varepsilon$ , odnosno uslovu  $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$ , jednaka je homogenom izduženju  $\varepsilon_{\text{hom}}$ . Sa slike 6 jasno je, da se sa porastom temperature žarenja od 265 do 320 °C, uslov za pojavu plastične nestabilnosti  $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$  odlaže ka većim stepenima deformacije, odnosno vrednost homogenog izduženja  $\varepsilon_{\text{hom}}$  raste.

U tabeli 2 date su vrednosti parametara ojačavanja ispitivane legure, dobijenih u toku jednoosnog zatezanja.



Slika 6. Zavisnost brzine deformacionog ojačavanja,  $d\sigma/d\varepsilon$ , i stvarnog napreznja,  $\sigma$ , od stvarne deformacije,  $\varepsilon$ , u toku jednoosnog zatezanja.  
Figure 6. True stress,  $\sigma$ , and strain hardening rate,  $d\sigma/d\varepsilon$ , as a function of true strain,  $\varepsilon$ , in tensile testing.

Tabela 2. Parametri ojačavanja u toku jednoosnog zatezanja ispitivane Al-Mg6,8 legure  
Table 2. Work hardening parameters in tensile testing for tested Al-Mg6.8 alloy

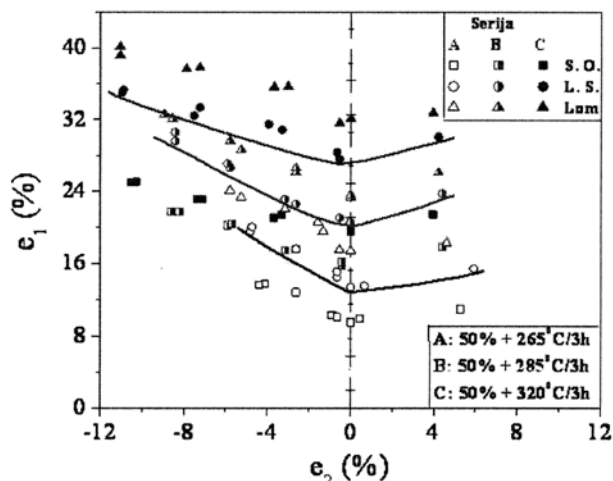
	$R_m - R_p$ (MPa)	$n$	$\varepsilon_{\text{hom}}$	$m$
265 °C	145	0,21	0,11	
285 °C	194	0,33	0,19	-0,005 ÷ -0,015
320 °C	180	0,34	0,21	

Rezultati pokazuju da se razlika između zatezne čvrstoće i granice tečenja,  $R_m - R_p$ , kao i vrednost indeksa deformacionog ojačavanja,  $n$ , povećava sa porastom temperature žarenja od 265 do 285 °C, odnosno do 320 °C. Takođe, rezultati dati u tabeli 2 pokazuju da u ispitivanom opsegu brzina deformacije, faktor osetljivosti na brzinu deformacije,  $m$ , ima negativnu vrednost, za sve tri serije uzoraka.

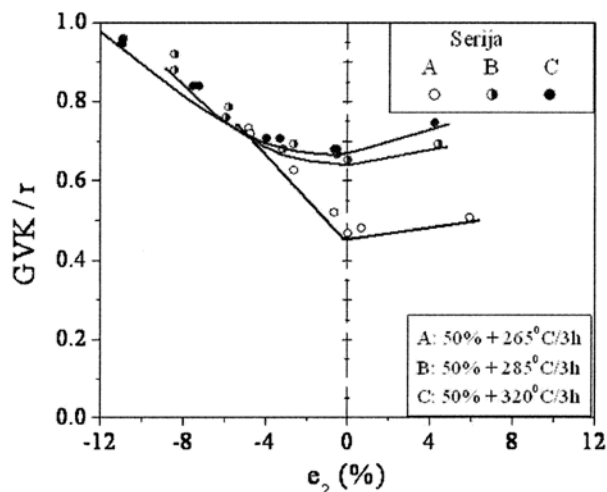
Na osnovu vrednosti graničnih deformacija  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  u zoni lokalnog stanjivanja (L.S.), konstruisane su granične krive oblikovanja po kriterijumu lokalnog stanjivanja – GKO (slika 7), i granične krive oblikovanja na bazi granične visine kupole – GVK (slika 8), za sve tri serije uzoraka A, B i C.

Sa povećanjem temperature žarenja dolazi do porasta nivoa graničnih deformacija, i porasta nivoa granične krive oblikovanja, što se vidi na slici 7.

Rezultati prikazani na slici 8 pokazuju da je nivo granične krive oblikovanja GVK veći kod uzoraka koji su žareni na temperaturama 285 i 320 °C, nego kod uzoraka žarenih na 265 °C. Takođe, može se zapaziti da je nivo GVK za uzorke iz serije B i C približno isti.



Slika 7. Granične krive oblikovanja (GKO) konstruisane po kriterijumu lokalnog stanjivanja za ispitivanu leguru  
Figure 7. Forming limit curves (FLC) for tested alloy constructed under criteria of local necking



Slika 8. Granične krive oblikovanja konstruisane na bazi granične visine kupole (GVK) za ispitivanu leguru  
Figure 8. Normalized limiting dome height (LDH) versus minor strain,  $e_2$  curves for tested alloy.

## DISKUSIJA

Mikrostrukturna ispitivanja su pokazala da se u toku žarenja na 265 °C obrazuje oporavljena struktura (slika 1a), dok, žarenjem na 285 i 320 °C u strukturi dolazi do rekristalizacije i obrazovanja potpuno rekristalisane strukture sa poligonalnim zrnima (slika 1b–c). Istovremeno sa odvijanjem procesa oporavljanja i rekristalizacije, u toku žarenja ispitivane legure Al–Mg6,8, dolazi i do promene sadržaja Mg u čvrstom rastvoru.

Za analizu promena sadržaja Mg koje nastaju u osnovi čvrstog rastvora korišćena je metoda merenja električnog otpora. Rezultati prikazani na slici 2, pokazali su da otpor ispitivane legure u deformisanom

stanju opada posle žarenja na 265 °C, što ukazuje na izdvajanje  $\beta$ -faze iz čvrstog rastvora. Sa povišenjem temperature žarenja do 285 °C, električni otpor raste, zato što se udeo  $\beta$ -faze u strukturi smanjuje, odnosno, sadržaj rastvorenih atoma Mg u čvrstom rastvoru raste. Posle žarenja na 320 °C postiže se maksimalna vrednost električnog otpora, što ukazuje na potpunu rastvorljivost Mg u čvrstom rastvoru. Na taj način, može se reći da se u uzorcima žarenim na temperaturama 265 i 285 °C postiže dvofazna ( $\alpha + \beta$ ) struktura, u kojoj je jedan deo Mg prisutan u čvrstom rastvoru, dok je drugi deo Mg izdvojen u obliku  $\beta$ -faze ( $Mg_5Al_8$ ). Žarenjem uzoraka na 320 °C postiže se jednofazna struktura  $\alpha$ -Al čvrstog rastvora, u kome je sav Mg potpuno rastvoren u čvrstom rastvoru Al. Ovi rezultati su u saglasnosti sa prethodnim istraživanjima [2,10,11].

Rezultati prethodnih istraživanja ispitivane legure [11] pokazala su da su uzorci sa oporavljenom dvofaznom ( $\alpha + \beta$ ) strukturom (žareni na 265 °C) i sa rekristalisanom dvofaznom ( $\alpha + \beta$ ) strukturom (žareni na 285 °C) veoma otporni prema koroziji, dok su uzorci sa rekristalisanom jednofaznom ( $\alpha$ -Al) strukturom (žareni na 320 °C) veoma osetljivi prema koroziji.

Za ocenu sposobnosti oblikovanja najčešće se koriste parametri koji se dobijaju u testu jednoosnim zatezanjem, kao što su: homogeno i ukupno izduženje,  $\epsilon_h$  i  $A$ , indeks deformacionog ojačavanja,  $n$ , brzina deformacionog ojačavanja,  $d\sigma/d\epsilon$ , osetljivost na brzinu deformacije,  $m$ , i razlika između zatezne čvrstoće i granice tečenja,  $R_m - R_p$ , ili se sposobnost oblikovanja ocenjuje na osnovu graničnih krivih oblikovanja (GKO, GVK) [3,6,12].

Karakteristike ojačavanja i deformaciono ponašanje ispitivane AlMg6,8 legure pri jednoosnom zatezanju na sobnoj temperaturi, prikazani su na slikama 3–6, i obuhvataju ispitivanje uticaja TMO na mehaničke osobine,  $R_p$ ,  $R_m$ ,  $A$ , brzinu deformacionog ojačavanja,  $d\sigma/d\epsilon$ , indeks deformacionog ojačavanja,  $n$ , i osetljivost na brzinu deformacije,  $m$ .

Na slici 3 pokazano je da se čvrstoća,  $R_p$  i  $R_m$ , ispitivane legure u deformisanom stanju smanjuje, a plastičnost,  $A$ , povećava, posle žarenja u intervalu temperatura od 265 do 320 °C. Razlog za ovakvo ponašanje leži u promenama u strukturi koje nastaju u toku žarenja. Kod uzoraka žarenih na 265 °C, zahvaljujući oporavljenoj strukturi, granica tečenja i zatezna čvrstoća imaju veće vrednosti, nego kod uzoraka koji su žareni na 285 i 320 °C, koji imaju potpuno rekristalisanu strukturu. U skladu sa promenama u strukturi koje nastaju pri zagrevanju, rezultati prikazani na slici 4 pokazuju da se nivo naprezanja u toku jednoosnog zatezanja smanjuje sa povećanjem temperature žarenja. Pri tome, isti nivo naprezanja postiže se u toku jednoosnog zatezanja uzoraka žarenih na 285 i 320 °C, koji je za ~ 80–100 MPa niži u odnosu

na nivo naprežanja kod uzoraka žarenih na 265 °C. Ovakva zavisnost je očekivana, jer je znatno veće naprežanje neophodno za uzorke sa oporavljenom, nego za uzorke sa rekristalisanom strukturom.

Rezultati dati u tabeli 2 pokazuju da sa porastom temperature žarenja, vrednost indeksa deformacionog ojačavanja raste od  $n \sim 0,2$  za seriju A, do  $n \sim 0,33$  za seriju uzoraka B i C, koje imaju približno istu vrednost indeksa  $n$ . Takođe, razlika između zatezne čvrstoće i granice tečenja,  $R_m - R_p$ , veća je kod uzoraka iz serije B i C, nego kod uzoraka iz serije A, što znači da je kapacitet za ojačavanje deformacijom veći kod uzoraka iz serije B i C nego kod uzoraka iz serije A.

Rezultati prikazani na slici 5 pokazuju uticaj temperature žarenja ispitivanih uzoraka na brzinu deformacionog ojačavanja,  $d\sigma/d\varepsilon$ , u toku jednoosnog zatezanja. Brzina deformacionog ojačavanja kod uzoraka sa oporavljenom strukturom, žarenih na 265 °C, veća je nego kod uzoraka žarenih na 285 i 320 °C, sa potpuno rekristalisanom strukturom. Naime, povećanje brzine deformacionog ojačavanja nastaje zbog povećane gustine dislokacija u oporavljenoj strukturi, u odnosu na rekristalisanu strukturu. Dislokacije prisutne u oporavljenoj strukturi predstavljaju prepreku za kretanje dislokacija, pa se otpor prema deformaciji povećava, odnosno  $d\sigma/d\varepsilon$  raste. Međutim, brzina deformacionog ojačavanja intenzivnije se smanjuje u oporavljenoj (265 °C), nego u rekristalisanom strukturi (285 i 320 °C), kao što je prikazano na slici 5. Zbog toga se, uslov za pojavu plastične nestabilnosti ( $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$ ) postiže pri manjem stepenu deformacije u oporavljenoj, nego u rekristalisanom strukturi, odnosno vrednost homogenog izduženja,  $\varepsilon_{\text{hom}}$ , manja je kod uzoraka žarenih na 265 °C, nego kod uzoraka koji su žareni na 285 i 320 °C, kao što je prikazano na slici 6 i u tabeli 2.

Poznato je da je sposobnost ojačavanja deformacijom, kao i sposobnost oblikovanja, ograničena pojavom plastične nestabilnosti, koja nastaje kada se brzina deformacionog ojačavanja izjednači sa stvarnim naprežanjem ( $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$ ), odnosno kada indeks deformacionog ojačavanja postane jednak homogenom izduženju ( $n = \varepsilon_{\text{h}}$ ). Za Al-Mg legure je karakteristično da je indeks deformacionog ojačavanja veći od veličine homogenog izduženja,  $n > \varepsilon_{\text{hom}}$  [3,5,8], što je pokazano i u slučaju ispitivane legure (tabela 2). Homogeno izduženje odgovara stepenu deformacije pri kome započinje lokalizovanje deformacije, odnosno stvaranje "vrata", dok, ponašanje materijala u ovoj oblasti najviše zavisi od faktora osetljivosti na brzinu deformacije,  $m$ , koji u slučaju ispitivane legure ima negativnu vrednost,  $m = -0,005 \div -0,015$  (tabela 2). Na taj način, veća vrednost indeksa deformacionog ojačavanja,  $n$ , u odnosu na vrednost homogenog izduženja,  $\varepsilon_{\text{hom}}$ , može se objasniti negativnom osetljivošću na brzinu deformacije ( $m < 0$ ) ispitivane legure, tj. malom vrednošću posthomogenog izduženja, što je zapaženo i drugim Al-Mg legurama [3,5,6].

Ocena sposobnosti oblikovanja na osnovu parametara dobijenih pri jednoosnom zatezanju nije dovoljno pouzdana za većinu Al-legura, pa se zbog toga za ocenu sposobnosti oblikovanja koristi test koji se zasniva na određivanju graničnih deformacija  $e_1$  i  $e_2$  (po kriterijumu lokalnog stanjivanja), odnosno na određivanju granične visine kupole (GVK), koji daje realniju procenu ponašanja materijala u praktičnim uslovima oblikovanja [6,12]. Zapravo, najbolje je za svaki materijal odrediti graničnu krivu oblikovanja (GKO i GVK) koji će uz parametre koji se dobijaju iz testa jednoosnim zatezanjem omogućiti pouzdanu procenu sposobnosti oblikovanja [4-8].

U slučaju ispitivane legure AlMg6,8 pokazano je da sa povišenjem temperature žarenja dolazi do porasta nivoa graničnih deformacija,  $e_1$  i  $e_2$ , i porasta nivoa graničnih krivih oblikovanja (GKO), što je prikazano na slici 7. U oblasti ravanskog stanja deformacije ( $e_2 = 0$ ) najniže vrednosti granične deformacije  $e_1$  imaju uzorci žareni na 265 °C, nešto veću uzorci žareni na 285 °C, a najveću uzorci žareni na 320 °C. Ove vrednosti graničnih deformacija  $e_1$ , u oblasti ravanskog stanja deformacije ( $e_2 = 0$ ), u dobroj su saglasnosti sa vrednostima ukupnog izduženja pri jednoosnom zatezanju, koje su prikazane na slici 3.

Rezultati prikazani na slici 8 pružaju realniju procenu sposobnosti oblikovanja ispitivane legure, jer osim graničnih vrednosti deformacija  $e_1$  i  $e_2$  uzimaju u obzir i preraspodelu deformacije u toku oblikovanja. U oblastima jednoosnog, ravanskog i dvoosnog stanja deformacije najbolju sposobnost oblikovanja na bazi granične visine kupole (GVK) pokazuju uzorci iz C serije (320 °C), i ona je nešto viša od vrednosti GVK za B seriju (285 °C), dok je za A seriju (265 °C) granična kriva oblikovanja na bazi granične visine kupole znatno niža. Dobijeni rezultati su skladu sa već publikovanim rezultatima [8].

Na osnovu nivoa graničnih krivih oblikovanja, koje su konstruisane po kriterijumu GVK, može se konstatovati da uzorci iz serije B i C, sa rekristalisanom strukturom koja se postiže žarenjem na 285 i 320 °C, imaju bolju sposobnost oblikovanja od uzoraka iz serije A, sa oporavljenom strukturom, koji su žareni na 265 °C. To znači da uzorci iz serije B i C imaju veću sposobnost da homogeno preraspodeljuju deformaciju u toku razvlačenja, nego uzorci iz serije A. Pretpostavlja se da homogeno raspodeli deformacije u toku oblikovanja doprinosi veća vrednost indeksa deformacionog ojačavanja, koji imaju uzorci iz serije B i C ( $n \sim 0,3$ ), od uzoraka iz serije A ( $n \sim 0,2$ ). Poznato je da se sa povećanjem brzine deformacionog ojačavanja poboljšava i sposobnost oblikovanja, ali za dobru sposobnost oblikovanja potrebno je da vrednost  $d\sigma/d\varepsilon$  bude velika pri velikim stepenima deformacije [12]. U ovom radu je pokazano da B i C serija uzoraka (žarenih na 285 i 320 °C) pokazuju veću vrednost,  $d\sigma/d\varepsilon$ , pri velikim stepenima deformacije u

toku jednoosnog zatezanja. Zbog toga se, pojava plastične nestabilnosti kod ovih uzoraka (B i C) odlaže ka većim stepenima deformacije, a vrednost graničnih deformacija  $e_1$  i  $e_2$ , kao i nivo GVK, raste u odnosu na seriju A. Drugim rečima, uzorci iz serije B i C imaju bolju sposobnost oblikovanja pri razvlačenju od uzoraka iz serije A. Zbog negativne osetljivosti na brzinu deformacije ispitivane legure ( $m \sim -0.005 \div -0.015$ ), odnosno malog posthomenog izduženja, granične deformacije pri oblikovanju,  $e_1$  i  $e_2$ , znatno su manje nego u legurama koje imaju pozitivnu osetljivost na brzinu deformacije [6,12]. Naime, negativna osetljivost na brzinu deformacije ( $m < 0$ ) najviše utiče na ponašanje u oblasti lokalizovanja deformacije, odnosno u oblasti lokalnog stanjivanja, što smanjuje sposobnost oblikovanja pri razvlačenju [4,6].

## ZAKLJUČAK

U ovom radu, ispitivan je uticaj strukture koja se postiže primenom različitih uslova termomehničke obrade (TMO), na sposobnost oblikovanja legure Al-Mg6,8. Uzorci sa rekristalisanom dvofaznom ( $\alpha + \beta$ ) i/ili jednofaznom  $\alpha$ -Al strukturom, pokazuju veći kapacitet za ojačavanje deformacijom i imaju bolju sposobnost oblikovanja, u odnosu na uzorke sa oporavljenom dvofaznom ( $\alpha + \beta$ ) strukturom. Parametri za ocenu sposobnosti oblikovanja, koji su dobi-

jeni pri jednoosnom zatezanju, u dobroj su korelaciji sa nivoom graničnih krivih oblikovanja (GKO i GVK), dobijenim pri dvoosnom razvlačenju.

## LITERATURA

- [1] L.F. Mondolfo, Aluminum alloys: Structure and Properties, Butterworths, Boston, 1976.
- [2] J.E. Hatch, Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, Metals Park, Ohio, 1984.
- [3] G.B. Burger, A.K. Gupta, P.W. Jeffrey, D.J. Lloydet, Mater. Charact. **35** (1995) 23–39.
- [4] T. Naka, G. Torikai, R. Hino, F. Yoshida, J. Mater. Process. Technol. **113** (2001) 648–653.
- [5] D.R. Kumar, K Swaminathan, Mater. Sci. Technol, **15** (1999) 1241–1252.
- [6] S.S. Hecker, Proceedings of IDDGR, Amsterdam, Holland, 1972, 5.1.
- [7] E. Romhanji, M. Popović, D. Glišić, R. Dodok, D. Jovanović, J. Mater. Proc. Technol. **177** (2006) 386–389.
- [8] E. Romhanji, M. Popović, D. Glišić, V. Milenković, J. Mater. Sci. **33** (1998) 1037–1042.
- [9] J.R. Davis, Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Intl., 1999.
- [10] Y. Nakayama, T. Takaai, D. Jin, Mater. Sci. Forum **217–222** (1996) 1269–1274.
- [11] M. Popović, Doktorska disertacija, TME, Beograd, 2003.
- [12] A.K. Ghosh, S.S. Hecker, S.P. Keeler, Workability Testing Techniques, ASM, 1984.

## SUMMARY

### INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE ON THE FORMABILITY OF Al-Mg6.8 ALLOY

(Scientific paper)

Boris G. Minov, Miljana M. Popović, Dragomir M. Glišić, Endre L. Romhanji  
Faculty of Technology and Metallurgy, Department for Metallurgical Engineering, Belgrade

Formability of Al-Mg6.8 alloy has been evaluated experimentally in uniaxial tension and biaxial stretching. Three different structures developed after cold rolling and annealing in the range of temperature from 265 to 320 °C: (I) recovered dual ( $\alpha + \beta$ ) phase, (II) recrystallized ( $\alpha + \beta$ ) dual phase, and (III) recrystallized  $\alpha$ -Al single phase structure, were tested. Samples with recovered structure have shown a lower formability level than the samples with fully recrystallized structure. Formability level assessed through FLD and LDH value, has been a result of complex interaction between work hardening ability and strain rate sensitivity.

Key words: Al-Mg alloy • Microstructure • Formability •

Ključne reči: Al-Mg legura • Mikrostruktura • Sposobnost oblikovanja •