Uticaj temperature rastvornog žarenja na svojstva aluminijumskih legura iz serije 6000

UROŠ S. STAMENKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Tehnički fakultet u Boru, Bor

SVETLANA LJ. IVANOV, Univerzitet u Beogradu,

Tehnički fakultet u Boru, Bor

IVANA I. MARKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Tehnički fakultet u Boru, Bor

NADA D. ŠTRBAC, Univerzitet u Beogradu,

Tehnički fakultet u Boru, Bor

ALEKSANDRA M. MITOVSKI, Univerzitet u Beogradu,

Tehnički fakultet u Boru, Bor

Originalni naučni rad

UDC: 669.715'721'782-157

DOI: 10.5937/tehnika1704523S

Legure iz serije 6000 spadaju u aluminijumske legure koje sadrže magnezijum i silicijum kao dva glavna legirajuća elementa. Pored ova dva glavna legirajuća elementa u leguri se pojavljuje i mangan i drugi elementi, u zavisnosti od tipa legure. Serija legura 6000 spada u grupaciju aluminijumskih legura koje su podložne termomehantičkoj obradi. Ove legure pokazuju najbolje mehaničke i fizičke osobine onda kada su veštačko starene, pojavom ojačavajuće β'' faze. Proces starenja uključuje rastvorno žarenje, kaljenje i starenje na definisanim temperaturama za određeno vreme. Svi navedeni procesi imaju direktan uticaj na fizičke i mehaničke osobine legure nakon izvršene termičke obrade. U ovom radu je ispitivan uticaj rastvornog žarenja na osobine dve aluminijumske legure iz serije 6000, EN AW-6060 i EN AW-6082. Uzorci su ispitivani na pet različitih temperatura u opsegu od 510 – 590 °C. Kako bi se ispitao uticaj rastvornog žarenja, izvršeno je merenje tvrdoće i elektroprovodljivosti uzoraka nakon adekvatne termičke obrade. Nakon ispitivanja, analiza je pokazala da sa povećanjem temperature rastvornog žarenja dolazi do povećanja tvrdoće i opadanja elektroprovodljivosti na starenim uzorcima usled bolje homogenizacije koja je uzrokovala bolju raspodelu metastabilnih faza.

Ključne reči: aluminijumske legure, termička obrada, tvrdoća, elektroprovodljivost

1. UVOD

Al-Mg-Si legure (legure iz serije 6000) se danas najviše koriste u automobilske i građevinske industriji. Poseban akcenat se stavlja na ojačavanju ovih legura zbog njihove primene u pomenutim industrijama [1]. Posebno važno za ove legure je mogućnost ojačavanja termičkim taloženjem – starenjem [2-4]. Termička obrada starenjem uključuje rastvorno žarenje, kaljenje i starenje na definisanoj temperaturi u toku određenog vremena. Svi navedeni procesi imaju direktan uticaj na fizičke i mehaničke osobine legure nakon izvršene termičke obrade. Precipitaciono ojača-

vanje je proces koji poboljšava karakteristike čvrstoće legure obrazovanjem sitnih i fino raspoređenih čestica sekundarne faze (fino disperzni talog) u primarnoj fazi (čvrstom rastvoru) matrice /5-7/. Fini talog u leguri usporava kretanje dislokacija, prisiljavajući dislokacije da vrše sečenje istaloženih čestica ili da ih zaobilaze. Ograničavanjem kretanja dislokacija na ovaj način legura ojačava. Precipitacioni niz koji se javlja u aluminijumskim legurama iz serije 6000 i koji je uopšte prihvaćen u naučnoj literaturi izgleda ovako: SSSS (α) – GP zone – β'' – β' – β (stabilna), gde SSSS (α) ili (assss) predstavlja prezasićeni čvrsti rastvor /2, 8, 9/. Svaka od ovih faza ima različit odnos magnezijuma i silicijuma. Najefektivniji ojačavajući precipitat za ove vrste materijala je β'' , β' je metastabilan ojačavajući precipitat, dok je β stabilna faza /9/. Tokom homogenizacije strukture čvrstog rastvora koja je neizbežna na temperaturi rastvornog žarenja dolazi do

Adresa autora: Uroš Stamenković, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Ive Lole Ribara 20
e-mail: ustamenkovic@tfbor.bg.ac.rs

Rad primljen: 10.07.2017.

Rad prihvaćen: 13.07.2017.

nekoliko različitih transformacija koje utiču na krajnje stanje legure nakon termičke obrade. Rastvaranje ravnotežne β -Mg₂Si faze je veoma važno jer direktno utiče na pojavu metastabilnih faza koje su odgovorne za ojačavanje legure pri starenju [3]. Stoga je veoma bitno ispitati uticaj rastvornog žarenja u čemu se i ogleda tematika ovog rada.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Istraživanja su obavljena na komercijalnim aluminijumskim legurama, konkretno na legurama EN AW-6060 i EN AW-6082. Hemijski sastav legura određen je pomoću portabilnog optičkog emisionog spektrometra „Belec Compact Port“ izrađen od strane Belec Spektrometrie Opto-Elektronik GmbH kompanije i može se videti u tabeli 1. Obe legure su dostavljene u već ojačanom stanju (T6 temper) od strane firme „AlCu metali d.o.o., Niš, Srbija“. Uzorci legura za analizu (slika 1) su isečeni na dimenzije 15x20x10 mm od jedne i 15x20x12 mm od druge legure i pažljivo su izabrani kako bi merenja mehaničkih i fizičkih osobina bila što tačnija. Temperature svih oblika termičke obrade su određene na osnovu podataka iz naučne literature. Uzorci su u prvoj fazi eksperimenta žareni radi uklanjanja polazne strukture na temperaturi od 550 °C u trajanju od 6 h i nakon toga su hlađeni na mirnom vazduhu. Temperatura rastvornog žarenja je bila u opsegu 510-590°C. Ispitivanja osobina legura izvršena su odmah nakon kaljenja u vodi sa ledom, nakon delimičnog i potpunog starenja legure. Eksperiment je definisan na ovaj način kako bi se utvrdio uticaj temperature rastvornog žarenja u različitim stanjima ojačanja legure.

Slika 1 - Uzorci legura za analizu

Određivanje mehaničkih osobina je obavljeno merenjem tvrdoće po Vickers-u uz korišćenje dijamanetskog utiskivača i sile od 98N (10 kP) u trajanju od 10 sekundi, dok je elektroprovodljivost merena direktno na uređaju za merenje elektroprovodljivosti „Sigma test 2.063“. Na svakom uzorku su izvršena više merenja i zatim izračunata srednja vrednost.

Kako bi se detaljnije ispitao uticaj temperature rastvornog žarenja izabrane su dve temperature iz opsega 510-590°C i urađena su metalografska ispitivanja uz pomoć optičkog mikroskopa Carl Zeiss Epytip 2.

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivanih legura

		EN AW-6060	EN AW-6082
Hemijski sastav u masenim procentima	Si	0.49	0.807
	Fe	0.182	0.354
	Cu	0.012	0.042
	Mn	0.006	0.453
	Mg	0.594	0.696
	Cr	<0.003	<0.012
	Ni	0.028	0.012
	Zn	0.01	0.115
	Ti	0.005	0.025
	Pb	<0.003	0.01
	V	0.014	<0.003
	Co	<0.003	0.006
	Sn	<0.003	<0.003
	Zr	<0.003	<0.003
	Al	98.62	97.45

3. REZULTATI ISPITIVANJA

Na slikama 2 i 3 mogu se videti rezultati tvrdoće u zavisnosti od temperature rastvornog žarenja kroz tri različita stanja: odmah nakon rastvornog žarenja i kaljenja (A1), nakon delimičnog starenja u trajanju od 1 časa na 180°C (A2) i nakon potpunog starenja u trajanju od 5 časova za EN AW-6060 i 6 časova za EN AW-6082 (A3).

Slika 2 - Uticaj temperature rastvornog žarenja na tvrdoću EN AW-6060 legure

Slika 3 - Uticaj temperature rastvornog žarenja na tvrdoću EN AW-6082 legure

Na slikama 4 i 5 prikazan je uticaj temperature rastvornog žarenja na elektroprovodljivost ispitivanih legura.

Slika 4 - Uticaj temperature rastvornog žarenja na elektroprovodljivost EN AW-6060 legure

Slika 5 - Uticaj temperature rastvornog žarenja na elektroprovodljivost EN AW-6082 legure

Analizom prikazanih rezultata može se videti da temperatura rastvornog žarenja ima uticaja i na elektroprovodljivost legura. Kod legure EN AW-6060 uticaj temperature rastvornog žarenja je daleko manji nego kod legure EN AW-6082. Uticaj je daleko jasniji kod EN AW-6082 legure upravo zbog razlike u hemijskom sastavu i količini legiranih elemenata. Prilikom porasta temperature rastvornog žarenja dolazi do sve intenzivnijeg rastvaranja stabilnih i metastabilnih faza u ispitivanim legurama. Rastvaranje pomenutih faza direktno utiče na pojavu metastabilnih faza prilikom starenja. Takođe, prisutnost metastabilnih faza direktno definiše i količina legiranih elemenata [3]. Elektroprovodljivost je definisana prenosom elektrona kroz kristalnu rešetku. Metastabilne faze koje se izdvajaju iz čvrstog rastvora mogu biti manje ili više koherentne sa kristalnom rešetkom čvrstog rastvora, u ovom slučaju sa površinski centriranom kubnom rešetkom aluminijuma. Svaka pojava nekoherentnosti dovodi do rasipanja elektrona u kristalnoj rešetci što dovodi do opadanja elektroprovodljivosti. Može se pretpostaviti na osnovu dobijenih rezultata da je usled intenzivnijeg zagrevanja uzoraka došlo do pojačanog rastvaranja faza, što je dovelo do pojave veće količine manje koherentnih faza prilikom starenja legura. Delimična koherentnost prisutnih faza je dovela do opadanja elektroprovodljivosti u materijalu [10].

Na slikama 6-9 mogu se videti mikrostrukture ispitivanih legura na dve izabrane temperature rastvornog žarenja. Ove temperature su izabrane kako bi se najjasnije uočila promena u mikrostrukтури usled promene temperature rastvornog žarenja. Uzorci su potpuno ostareni (stanje A3).

Slika 6 - Izgled mikrostrukture legure EN AW-6060 pri temperaturi rastvornog žarenja od 510°C, uveličanje x500

Sa prikazanih mikrofotografija vidi se uticaj temperature rastvornog žarenja. Uzorci EN AW-6082 koji su rastvorno žareni na višim temperaturama imaju homogeniju strukturu što je u saglasnosti sa rezultatima tvrdoće i elektroprovodljivosti.

Slika 7 - Izgled mikrostrukture legure EN AW-6060 pri temperaturi rastvornog žarenja od 570°C, uveličanje x500

Slika 8 - Izgled mikrostrukture legure EN AW-6082 pri temperaturi rastvornog žarenja od 510°C, uveličanje x500

Slika 9 - Izgled mikrostrukture legure EN AW-6082 pri temperaturi rastvornog žarenja od 590°C, uveličanje x500

Kod legure EN AW-6060 uticaj temperature rastvornog žarenja se nešto slabije vidi što je takođe u saglasnosti sa dobijenim rezultatima tvrdoće i elektroprovodljivosti.

4. ZAKLJUČAK

Iz prezentovanih rezultata mogu se izvući sledeći zaključci:

- Temperatura rastvornog žarenja kao jedan od parametara kod termičke obrade starenjem ima uticaja na strukturu i svojstva aluminijumskih legura iz serije 6000.
- Uticaj temperature rastvornog žarenja je jači onda kada je legura više legirana, zbog intenzivnijeg rastvaranja legirajućih elemenata koji su odgovorni za nastajanje metastabilnih faza. Kod legure EN AW-6082 ovaj uticaj je jasnije izražen nego kod EN AW-6060 legure.
- Sa porastom temperature rastvornog žarenja kod obe legure dolazi do porasta tvrdoće usled disperznijeg rasporeda metastabilnih faza i bolje homogenosti. Kod legure EN AW-6060 maksimalna vrednost tvrdoće dobijena je na temperaturi rastvornog žarenja od 570°C, dok je kod legure EN AW-6082 ta vrednost 590°C.
- Porast temperature rastvornog žarenja dovodi do opadanja elektroprovodljivosti usled intenzivnijeg rastvaranja faza i kasnije pojave delimično koherentnih faza koje dovode do rasipanja elektrona.
- Dobijeni rezultati mogu poslužiti prilikom termomehaničke obrade ispitivanih legura kao smernica za definisanje izlazne temperature poluproizvoda nakon tople plastične deformacije, koja uobičajeno prethodi procesu kaljenja u industrijskim uslovima.
- Nastavak istraživanja mogao bi se ogledati u ispitivanju brzine hlađenja (kaljenja) kao jednog od parametara prilikom termičke obrade starenjem i eventualna konstrukcija TTT dijagrama za date legure.

5. ZAHVALNICA

Ova istraživanja su podržana od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekta OI172037 koje finansira.

LITERATURA

- [1] Abid T, Boubertakh A, Hamamda S, Effect of pre-aging and maturing on the precipitation hardening of an Al-Mg-Si alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 490, No. 1-2, pp. 166-169, 2010.
- [2] Morowka-Nowotnik G, Influence of chemical composition variation and heat treatment on microstructure and mechanical properties of 6xxx alloys, *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 46, No. 2, pp. 98-107, 2010.
- [3] Morowka-Nowotnik G, Sieniavski J, Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys, *Journal*

- of Materials Processing Technology*, Vol. 162–163, pp. 367–372, 2005.
- [4] Li-xin C, Zhen-xing L, Xiao-guang Z, Jian-guo T, Ke L, Xing-xing L, Chen Q, Precipitation of metastable phases and its effect on electrical resistivity of Al-0.96Mg2Si alloy during aging, *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, Vol. 24, pp. 2266-2274, 2014.
- [5] Troeger L. P, Starke E. A, Microstructural and mechanical characterization of a superplastic 6xxx aluminum alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 277, pp. 102-113, 2000.
- [6] Burger G. B, Jeffrey P. W, Lloyd D. J, Microstructural control of aluminum sheet used in automotive applications, *Materials Characterization*, Vol. 35, pp. 23-29, 1995.
- [7] Edwards G. A, Stiller K, Dunlop G. L, Couper M. J, The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys, *Acta Materialia*, Vol. 46 No. 11, pp. 3893-3904, 1998.
- [8] Chee F. T, Said M. R, Effect of hardness test on precipitation hardening aluminum alloy 6061-T6, *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 36, pp. 276-286, 2000.
- [9] Masoud I. M, Mansour A. T, Al-Jarrah J. A, Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Hardening Properties of 6061 Aluminum Alloy, *Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 8, No. 10, pp. 5106-5113, 2012.

SUMMARY

THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE OF SOLUTION HEAT TREATMENT ON THE PROPERTIES OF 6000 SERIES ALUMINIUM ALLOYS

The 6000 series alloys belong to the group of aluminium alloys that contain magnesium and silicon as their two main alloying elements. In addition to these two alloying elements, the alloys contain manganese and other elements, in accordance to the type of alloy. Alloys from this series belong to the group of aluminium alloys which are susceptible to thermo-mechanical treatment. These alloys exhibit the best mechanical and physical properties when they are artificially aged, with the occurrence of the strengthening β'' phase. The process of ageing includes solution heat treatment, quenching and ageing at predefined temperatures for a specified amount of time. All the aforementioned processes have a direct impact on the physical and mechanical properties of the alloy following the performed thermal treatment. In this paper the influence of the temperature of solution heat treatment on the properties of two aluminium alloys belonging to the 6000 series was examined, EN AW-6060 and EN AW-6082. The samples were examined at five different temperatures varying from 510-590° C. In order to examine the influence of the temperature of solution heat treatment, measurements of the hardness and electrical conductivity of the samples were performed, following adequate thermal treatment. After the testing, analysis of the results showed that with the increase of the temperature of soluble annealing, there occurred an increase in hardness, and a decrease in electrical conductivity in the aged samples, due to a better homogenization which caused a better distribution of metastable phases.

Key words: aluminium alloys, heat treatment, hardness, electrical conductivity