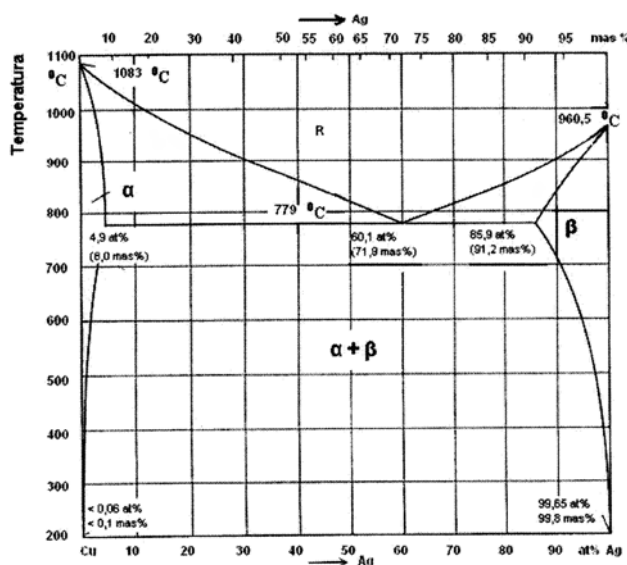


KORELACIJA IZMEĐU MEHANIČKIH OSOBINA I STRUKTURNIH PROMENA SINTEROVANE LEGURE Cu-4 at% Ag TOKOM TERMOMEHANIČKE OBRADU

U ovom radu dati su rezultati ispitivanja uticaja termomehaničke obrade na mikrostrukturu i ojačavanje (tvrdoću i mikrotvrdoću) bakarne legure Cu-4 at% Ag dobijene sinterovanjem smeše prahova bakra i srebra. Nakon sinterovanja, izvršena je termomehanička obrada koja je obuhvatala hladno valjanje sa stepenima deformacije 20, 40 i 60% i žarenje iznad i ispod temperature rekristalizacije uz merenje vrednosti tvrdoće, mikrotvrdoće i posmatranje strukturnih promena optičkim mikroskopom. Pokazano je da se mikrostruktura legure Cu-4 at% Ag menja sa izvršenom termomehaničkom obradom što direktno uslovljava promene mehaničkih osobina. Naime, mehaničke osobine rastu sa porastom stepena deformacije kao posledica deformacionog ojačavanja, međutim mehaničke osobine nastavljaju da rastu i nakon žarenja na temperaturama nižim od temperature rekristalizacije, a zbog mehanizma ojačavanja žarenjem. Žarenje na višim temperaturama dovodi do pada mehaničkih osobina kao posledica početka rekristalizacije legure.

Legure sistema Cu-Ag poseduju izvanrednu kombinaciju dobrih mehaničkih osobina i dobre električne provodnosti, što ih čini privlačnim za izradu provodnika velikih struja. Naime, od materijala za izradu provodnika zahteva se kombinacija dobrih mehaničkih osobina (naponi na istezanje veći od 1 GPa) i velike električne provodnosti (električna provodnost veća od 75% IACS*). Legure sistema Cu-Ag, sem dobrih mehaničkih osobina i velike provodnosti, pogodne su za izradu provodnika zbog još dva razloga. Prvi razlog je mogućnost modifikacije mehaničkih osobina konvencionalnim termomehaničkim procesima, čime se može postići da vrednosti napona na istezanje budu veće od 1000 MPa. Drugi razlog je taj što jedino srebro od legirajućih elemenata ima neznatan uticaj na električnu provodnost bakra, koja se, međutim, smanjuje legiranjem sa elementima koji grade čvrste rastvore sa bakrom. Nečistoće i drugi legirajući elementi, sem srebra, snižavaju električnu provodnost bakarnih legura [1].

Mikrostruktura legura bakra se jako menja sa promenom sadržaja srebra, a naravno i sa primenom termomehaničkom obradom [2]. Na osnovu dijagrama stanja (slika 1) uočljivo je da maksimalna rastvorljivost srebra u bakru iznosi 4,9 at%. Legura izabrana za ispitivanje sadrži 4 at% srebra, pa se za sinterovanu leguru Cu-4 at% Ag, koja je predmet ovog istraživanja, očekuje da u toku sinterovanja



Slika 1. Dijagram stanja sistema Cu-Ag
Figure 1. Equilibrium diagram of the system Cu-Ag

obrazuje homogen čvrst rastvor srebra u bakru bez obrazovanja eutektikuma.

Naša preliminarna istraživanja efekta ojačavanja žarenjem na različitim livenim i sinterovanim bakarnim legurama [3,4] pokazala su da dolazi do poboljšanja mehaničkih osobina (tvrdoće, zatezne čvrstoće) na račun tog ojačavajućeg mehanizma. Od širokog dijapazona legura koje su istraživane, kao najbolja pokazala se legura sistema bakar-srebro i zato je ona odabrana za ovo istraživanje. U ovom radu je dat deo sprovedenih istraživanja proučavanja strukturnih promena sinterovane legure Cu-4 at% Ag pri termomehaničkoj obradi koja uslovljava poja-

* 100% IACS = električna provodnost od 58,0 MS/m

Adresa autora: I. Rangellov, Tehnički fakultet u Boru, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor

E-mail: irangelov@tf.bor.ac.yu; i.rang@yahoo.com

Rad primljen: Februar 18, 2008.

Rad prihvaćen: Mart 20, 2008.

vu ojačavajućeg mehanizma, kao i korelacija ojačavanja i strukturnih promena.

EKSPERIMENTALNI DEO

Legure Cu-4 at% Ag dobijene su tehnologijom metalurgije praha. Napravljene su homogene smeše od elektrolitičkog bakarnog praha i praha srebra čistoće 99,99%, granulometrijskih sastava (određenih metodom standardne sitovne analize) datih u tabeli 1.

Tabela 1. Granulometrijski sastav elementarnih prahova Cu i Ag (ISO 4497/83)

Table 1. Particle size distribution of elemental copper and silver powders (ISO 4497/83)

Otvor sita, μm	Frakcija praha, %	
	Cu	Ag
+80	1,68	2,32
-80 + 71	1,0	1,08
-71 + 63	9,1	15,76
-63 + 50	18,56	8,5
-50 + 45	7,83	2,98
-45	61,82	69,36

Mešanje i homogenizacija smeše prahova bakra i srebra izvršena je u troosnom mikseru (mešaču) u trajanju od 2 h. Mešanje elementarnih prahova imalo je za cilj postizanje ravnomerne i fine raspodele komponenti i dovoljnog stepena homogenizacije.

Otpresci približnih dimenzija 12x30x6,5 mm dobijeni su presovanjem homogene smeše elementarnih prahova na jednostranoj hidrauličnoj presi, pritiskom od 350 MPa. Otpresci su sinterovani na temperaturi od 790 °C (eutektička temperatura 779 °C) u cevnoj peći u trajanju od 1 h, u atmosferi čistog vodonika pri brzini zagrevanja peći od 15 °C/min. Nakon sinterovanja uzoraka, njihovo hlađenje je izvršeno strujom vodonika brzinom od 12 °C/min do 300 °C, a nakon toga hlađenje do sobne temperature je izvršeno na vazduhu, zbog smanjenja sklonosti legure ka oksidaciji na nižim temperaturama. Sinterovani uzorci legure Cu-4 at% Ag dalje su hladno valjani sa različitim stepenima deformacije (20, 40 i 60%) uz merenje tvrdoće po Vikersu (opterećenje 50 N), mikrotvrdoće metodom Vikersa (opterećenje 100 g), uz određivanje gustine i uz posmatranje mikrostrukturnih promena optičkim mikroskopom pri uvećanju od 500 puta. Hladno deformisana ($\epsilon = 60\%$) legura Cu-4 at% Ag je dalje podvrgnuta izohronom žarenju, u peći bez zaštitne atmosfere na temperaturama u intervalu 160–600 °C za vreme od 30 minuta. Nakon žarenja na svakoj, prethodno odabranoj, temperaturi iz temperaturnog intervala 160–600 °C merene su vrednosti tvrdoće, s ciljem ispitivanja porasta mehaničkih osobina na račun efekta ojačavanja žarenjem. Pošto je porast tvrdoće najintenzivniji nakon žarenja

na 260 °C, izmerena je mikrotvrdoća i posmatrana je mikrostruktura hladno deformisane ($\epsilon = 60\%$) legure Cu-4 at% Ag upravo nakon žarenja na naznačenoj temperaturi, kao i na najvišoj temperaturi iz intervala žarenja, a radi upoređenja.

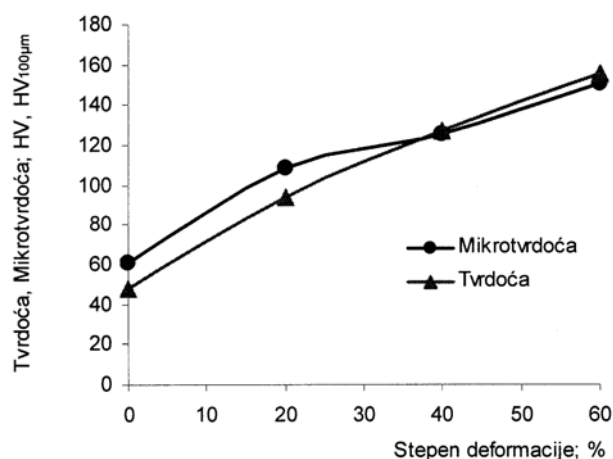
REZULTATI I DISKUSIJA

Pre samog procesa izrade sinterovanih uzoraka i termomehaničke obrade istih, polaznim, elementarnim prahovima bakra i srebra su ispitana tehnološka svojstva: nasipna gustina i tečljivost, a na osnovu rezultata datih u tabeli 2 zaključeno je da su polazni prahovi standardnog kvaliteta bez odstupanja u osobinama koje bi uticale na kvalitet gotovih proizvoda.

Tabela 2. Vrednosti nasipne gustine (ISO 3923-1/1979) i tečljivosti (ISO 4490/1978) korišćenih prahova
Table 2. Values of apparent density (ISO 3923-1/1979) and flow time (ISO 4490/1978) of used powders

Vrsta praha	Nasipna gustina, g/cm^3	Tečljivost, s/50 g
Cu	1,35	20,2
Ag	2,01	44,9

Vrednosti tvrdoće i mikrotvrdoće sinterovane legure Cu-4 at% Ag rastu s porastom stepena hladne deformacije (slika 2). Ojačavanje čvrstog rastvora srebra u bakru jeste posledica reakcije dislokacija i to kako postojećih tako i stvorenih u toku plastične deformacije, kao i reakcije dislokacija sa atomima rastvorenog srebra. Pri plastičnoj deformaciji sinterovane legure Cu-4 at% Ag, dislokacije međusobno reaguju i obrazuju nepokretne dislokacije, koje su prepreke za kretanje drugih dislokacija. S napredovanjem deformacije broj prepreka se povećava, pa je



Slika 2. Vrednosti tvrdoće i mikrotvrdoće sinterovane legure Cu-4 at% Ag u zavisnosti od stepena deformacije

Figure 2. Dependence of hardness and microhardness of sintered Cu-4 at% Ag alloy on deformation degree

potrebno primeniti sve veći i veći napon da bi se deformacija nastavila. Kao posledica deformacionog ojačavanja vrednosti tvrdoće i mikrotvrdoće sinterovane legure Cu-4 at% Ag rastu sa porastom stepena deformacije [5,6], a najveće vrednosti mehaničkih osobina datih uzoraka su postignute posle deformisanja stepenom deformacije od 60%, naime, vrednosti mikrotvrdoće rastu sa 61 (sinterovano stanje) na 151 HV_{100µm} (uzorak deformisan najvećim primenjenim stepenom deformacije od 60%), odnosno vrednosti tvrdoće sa 48 na 156 HV.

Analizirane su i vrednosti gustine sinterovane legure Cu-4 at% Ag tokom hladnog valjanja, kao i smanjenje poroznosti izazvano zaptivanjem pora tokom hladne plastične deformacije, a rezultati su prikazani u tabeli 3.

Poroznost utiče na mehaničke i druge osobine sinterovanog materijala više nego što utiču hemijski sastav i struktura. Porast gustine i smanjenje poroznosti izazvane hladnim valjanjem uslovljavaju porast mehaničkih osobina (slika 2).

Na slici 3 je dat detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag. Sinterovanje je izvršeno na 790 °C, tj. na nešto višoj temperaturi u odnosu na eutektičku temperaturu sistema Cu-Ag. Na prikazanoj fotografiji mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag ne može se uočiti mikrostruktura karakteristična za sinterovanje u prisustvu tečne faze [7-9], odakle se zaključuje da se u leguri Cu-4 at% Ag u toku sinterovanja odigralo sinterovanje u prisustvu čvrste faze. Mikrostruktura sinterovane legure Cu-4 at% Ag prikazana na slici 3 pokazuje relativno homogenu strukturu sa prisustvom sferičnih pora, koje se na slici zapažaju u vidu crnih tačaka. Polazne čestice metalnih prahova ne mogu se više raspoznati, a novonastala struktura sinterovane legure sastoji se od ravnosnih zrna, razdvojenih granicama zrna i prisutnih pora [10]. Karakteristično za sinterovano stanje legure je upravo obrazovanje sferičnih pora, koje su zarobljene granicama zrna ili koje se nalaze u samom zrnu, i koje uslovljavaju niže vrednosti gustine u odnosu na teoretsku gustinu (tabela 3).

Na slici 4 prikazan je detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladne plastične

Tabela 3. Promena gustine i poroznosti sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladnog valjanja sa različitim stepenima deformacije

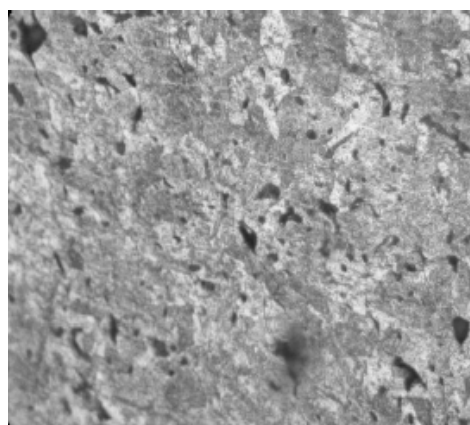
Table 3. Changes of density and porosity for sintered Cu-4 at% Ag alloy after cold rolling with different deformation degrees

Stepen deformacije, %	Gustina, g/cm ³	Poroznost, %
0	7,11	21
20	7,76	13
40	8,31	7
60	8,69	3



Slika 3. Detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag; 500×

Figure 3. Optical micrograph of sintered Cu-4 at% Ag alloy microstructure; 500×



Slika 4. Detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladne plastične deformacije sa stepenom deformacije 20%; 500×

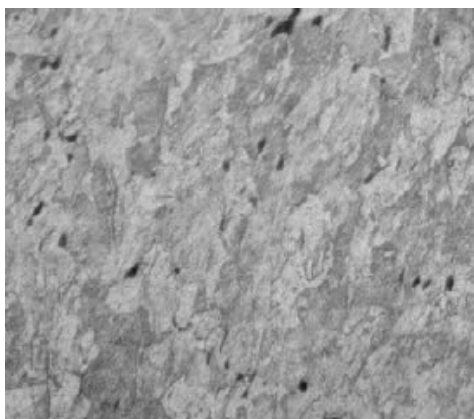
Figure 4. Optical micrograph of sintered Cu-4 at% Ag alloy 20% deformed microstructure; 500×

deformacije ostvarene hladnim valjanjem sa stepenom deformacije 20%.

Za mikrostrukturu datu na slici 4 karakteristična su izdužena zrna u pravcu valjanja. Takođe se uočava da su i pore izdužene u pravcu valjanja, jer hladna plastična deformacija menja i oblik pora, odnosno iz sferičnog oblika pore prelaze u eliptičan oblik.

Slike 5 i 6 prikazuju detalje mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladne plastične deformacije sa stepenima deformacije 40% (slika 5) i 60% (slika 6).

Sa slika 5 i 6 uočava se da se izdužavanje zrna, kao posledica nastava deformisanja većim stepenima deformacije nastavlja, s tim što dolazi i do znatnog smanjenja poroznosti što je vizuelno potvrđeno, ali i merenjem poroznosti (tabela 3). Takođe, nastavlja se i izduživanje pora u pravcu valjanja, što na ne-



Slika 5. Detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladne plastične deformacije sa stepenom deformacije 40%; 500×

Figure 5. Optical microphotograph of sintered Cu-4 at% Ag alloy 40% deformed microstructure; 500×



Slika 6. Detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladne plastične deformacije sa stepenom deformacije 60%; 500×

Figure 6. Optical microphotograph of sintered Cu-4 at% Ag alloy 60% deformed microstructure; 500×

kim delovima uslovljava njihovo zatvaranje. Tokom plastične deformacije, kristalna rešetka zrna rotira i teži da se postavi u povoljniji položaj u pravcu dejstva sile. Na ovaj način je nastala relativno ravnomerna, usmerena kristalna struktura svih zrna, odnosno nastala je tekstura deformacije [10]. S povećanjem stepena deformacije povećava se gustina dislokacija [11]. Zbog malih dimenzija, dislokacije se nisu mogle registrovati optičkim mikroskopom već je za to potreban elektronski mikroskop, ali nagrizanjem i posmatranjem optičkim mikroskopom otkrivena su mesta izlaska dislokacionih linija iz kristalnih ravni, odnosno zapažene su linije i trake klizanja, odnosno deformacije, koje su najjasnije uočljive za leguru deformisanu s najvećim stepenom deformacije (slika 6).

Na temperaturi eutektikuma (779 °C) rastvorljivost srebra u bakru je maksimalna (slika 1) i iznosi

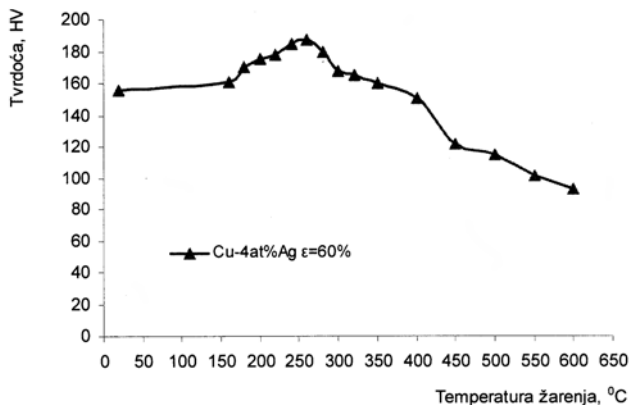
oko 8 mas%, tj. oko 4,9 at%. Rastvorljivost srebra u bakru jako opada sa sniženjem temperature, pa na sobnoj temperaturi rastvorljivost srebra u bakru iznosi manje od 0,1 mas%, tj. manje od 0,06 at%. Na osnovu iznetog, zaključuje se da u sistemu Cu-Ag strana bogata bakrom ispunjava uslove za ojačavanje termičkim taloženjem (iz prezasićenog čvrstog rastvora izdvaja se metalno srebro iz bakarne matrice) [12]. Pošto su mehanizmi ojačavanja žarenjem i termičkim taloženjem donekle slični [13], pretpostavljeno je da će hladno deformisana, sinterovana legura Cu-4 at% Ag ojačavati žarenjem [14,15].

Ovaj ojačavajući efekat prvenstveno je bio proučavan na livenim bakarnim legurama, međutim naša prethodna istraživanja su uglavnom rađena na sinterovanim bakarnim legurama. Dokazano je da se promene do kojih dolazi prilikom žarenja hladno deformisanih legura, jedino mogu objasniti uzajamnim dejstvom atoma osnovnog i legirajućeg elementa (sređivanje kratkog dometa) i međudejstvom atoma legirajućeg elementa sa greškama u rešetki [13]. Novija, detaljnija istraživanja mehanizma ojačavanja žarenjem (najčešće su proučavane legure sistema Cu-Al) pokazuju da je segregacija rastvorenih atoma na dislokacijama dominantan faktor odgovoran za ovaj ojačavajući mehanizam [13-15].

Izbor legure za ovaj eksperiment je usledio zbog činjenice da, na osnovu dostupne literature, nije proučeno da je efekat ojačavanja žarenjem proučavan na legurama sistema Cu-Ag. Upravo iz tih razloga je sinterovana legura Cu-4 at% Ag nakon hladnog valjanja sa stepenom deformacije od 60% podvrgnuta izohronom žarenju na različitim temperaturama u intervalu od 160 do 600 °C. Prethodnim ispitivanjima [3,4,13-15] pokazano je da je efekat ojačavanja izraženiji za veće prethodne stepene deformacije, a kao posledica unošenja većeg broja defekata pri deformaciji i intenzivnije rekombinacije parcijalnih dislokacija. Stoga su žarenju podvrgnuti samo uzorci deformisani najvećim stepenom. Vrednosti tvrdoće sinterovane legure Cu-4 at% Ag, deformisane sa stepenom deformacije od 60%, nakon izohronog žarenja od 30 minuta na temperaturama u intervalu 160-600 °C, date su na slici 7.

Na osnovu krive date na slici 7, u temperaturnom intervalu žarenja 160-350 °C zapaža se znatan porast tvrdoće hladno deformisane legure Cu-4 at% Ag u odnosu na vrednost tvrdoće nežarene, hladno deformisane legure Cu-4 at% Ag. Porast tvrdoće u tom intervalu se javlja kao posledica efekta ojačavanja žarenjem. Tek na temperaturama žarenja iznad 400 °C dolazi do intenzivnijeg pada tvrdoće, a kao posledica početka procesa rekristalizacije.

Kod sinterovane legure Cu-4 at% Ag, koja je deformisana sa stepenom deformacije od 60%, najveći intenzitet efekta ojačavanja žarenjem javlja se na temperaturi od oko 260 °C, kada se tvrdoća povećala



Slika 7. Vrednosti tvrdoće sinterovane legure Cu-4 at% Ag deformisane sa stepenom deformacije od 60% nakon izohronog žarenja

Figure 7. The hardness of sintered Cu-4 at% Ag alloy deformed with 60% deformation degree after isochronal annealing

za oko 31 HV u odnosu na tvrdoću hladno deformisanog uzorka. Dislokacije koje se unose hladnim valjanjem, a sa porastom stepena deformacije njihov broj je veći (slika 6), omogućavaju olakšanu difuziju atoma srebra i njihovo gomilanje na istim, što otežava njihovo kretanje i tako prouzrokuje ojačavanje. Naime, sa porastom temperature žarenja dolazi do intenzivnije segregacije atoma srebra na dislokacijama, analogno formiranju Cottrellovih atmosfera u intersticijski čvrstim rastvorima, što je primarno odgovorno za opisani fenomen ojačavanja žarenjem [7].

Kako je efekat ojačavanja žarenjem najintenzivniji nakon žarenja hladno deformisane legure Cu-4 at% Ag na 260 °C izvršeno je i ispitivanje vrednosti mikrotvrdoće i strukturnih promena nakon žarenja upravo na toj temperaturi. Vrednosti mikrotvrdoće hladno deformisane, sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon žarenja na 260 i 600 °C prikazane su u tabeli 4.

Tabela 4. Vrednosti mikrotvrdoće hladno deformisane ($\epsilon = 60\%$) sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon žarenja

Table 4. Microhardness values of cold deformed ($\epsilon = 60\%$) sintered Cu-4 at% Ag alloy after annealing

Temperatura žarenja, °C	Mikrotvrdoća, HV _{100µm}
20	151
260	175
600	98

Posle žarenja na 260 °C legura Cu-4 at% Ag predhodno valjana sa stepenom deformacije 60%, ima mikrotvrdoću od 175 HV_{100µm}, tj. za 24 HV_{100µm} veću u odnosu na hladno deformisano stanje, a kao posledica ojačavanja žarenjem.

Slika 8 prikazuje detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladne plastične deformacije sa stepenom deformacije 60% i žarenja na



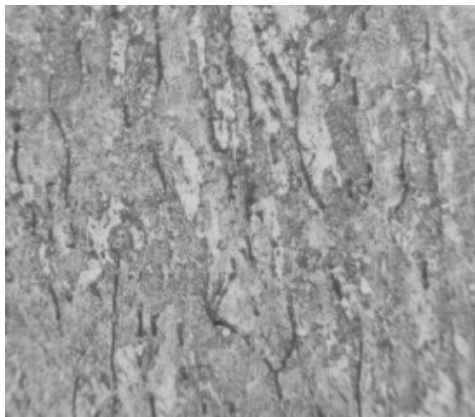
Slika 8. Detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladne plastične deformacije sa stepenom deformacije 60% i žarenja na 260 °C; 500×

Figure 8. Optical microphotograph of a microstructure of sintered Cu-4 at% Ag alloy 60% deformed after annealing at 260 °C; 500×

260 °C, odnosno predstavlja strukturu sinterovane legure Cu-4 at% Ag u toku trajanja efekta ojačavanja žarenjem. Na slici 8 zapažaju se još uvek izdužena zrna u pravcu valjanja. Ono što se ne zapaža optičkim mikroskopom (zbog relativno malih uvećanja, do 500×) jeste izdvajanje atoma srebra na dislokacijama, što dovodi do ojačavanja, a što su i veće vrednosti tvrdoće i mikrotvrdoće potvrdile. Radi detaljnijeg ispitivanja promena u mikrostrukтури tokom žarenja i analize segregacije atoma legirajućeg elementa na dislokacijama potrebno je koristiti transmisioni i skenirajući elektronski mikroskop, jer se klasičnom, optičkom mikroskopijom date promene nisu mogle uočiti.

Tek posle žarenja na višim temperaturama od 400 °C dolazi do pada tvrdoće kao posledica početka rekristalizacije legure Cu-4 at% Ag i uzajamnog dejstva ojačavanja žarenjem i rekristalizacije, pri čemu s porastom temperature rekristalizacija postaje dominantna. Međutim, čak i nakon žarenja na 600 °C legura Cu-4 at% Ag nije potpuno rekristalisala, jer su vrednosti tvrdoće (93 HV) i mikrotvrdoće (98 HV_{100µm}) i nakon žarenja relativno visoke u odnosu na polazno sinterovano stanje (48 HV i 61 HV_{100µm}).

Na slici 9 dat je detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladne plastične deformacije sa stepenom deformacije 60% i žarenja na 600 °C. Na relativno visokoj temperaturi žarenja od 600 °C došlo je do početka stvaranja klica i rasta novih nedeformisanih zrna na račun deformisane osnove, tj. došlo je do početka rekristalizacije. Međutim, na pojedinim mestima još uvek se zapažaju izdužena zrna u pravcu valjanja, što upućuje na činjenicu da deformisana struktura nije u potpunosti zamenjena nedeformisanom strukturom, tj. da se rekristalizacija nije u potpunosti odvila, što potvrđuju i rezultati merjenja tvrdoće i mikrotvrdoće.



Slika 9. Detalj mikrostrukture sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon hladne plastične deformacije sa stepenom deformacije 60% i žarenja na 600 °C; 500×

Figure 9. Optical microphotograph of a microstructure of sintered Cu-4 at% Ag alloy 60% deformed after annealing at 600 °C; 500×

ZAKLJUČAK

Na osnovu iznetih rezultata izvode se sledeći zaključci:

– Mikrostruktura sinterovane legure Cu-4 at% Ag značajno se menja u toku mehaničke obrade kao posledica uklanjanja poroznosti, izduživanja zrna u pravcu deformacije, kao i unošenja grešaka u kristalnu rešetku i njihovog međusobnog koćenja, a što dovodi do porasta mehaničkih osobina, odnosno tvrdoće i mikrotvrdoće.

– Vrednosti tvrdoće i mikrotvrdoće sinterovane legure Cu-4 at% Ag rastu sa porastom stepena hladne plastične deformacije, kao posledica deformacionog ojačavanja legure.

– Efekat ojačavanja žarenjem javio se kod sinterovane legure Cu-4 at% Ag nakon žarenja hladno deformisane legure u intervalu 160–350 °C, a manifestovao se porastom vrednosti tvrdoće i mikrotvrdoće.

– Čak i nakon izohronog žarenja na 600 °C sinterovana legura Cu-4 at% Ag nije potpuno rekristalizaciona, jer su vrednosti tvrdoće i mikrotvrdoće i nakon žarenja relativno visoke u odnosu na polazno (sinterovano) stanje, kao posledica dominantnog ojačavanja žarenjem u odnosu na rekristalizaciju.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke na finansijskoj podršci projektom TR 6730.

LITERATURA

- [1] www.emlsymposium.org/13th_papers/docs/EML021.pdf
- [2] J.B. Liu, L. Meng, L. Zhang, Rare Earth Microalloying in As-cast and Homogenized Alloys Cu-6 wt% Ag and Cu-24 wt% Ag, *J. Alloys Comp.* **425** (2006) 185–190.
- [3] S. Nestorović, D. Marković, Influence of Alloying on the Anneal Hardening Effect in Sintered Copper Alloys, *Mater. Trans. JIM* **40** (1999) 222–224.
- [4] S. Nestorović, Influence of Alloying and Secondary Annealing on the Hardening Effect at Sintered Copper Alloys, *Bull. Mater. Sci.* **28** (2005) 401–403.
- [5] B. Katavić, M. Nikačević, B. Živojinović, E. Romhanji, R. Aleksić, Effects of Plastic Deformation on the Properties of W-Ni-Fe Heavy Alloys, *Sci. Sint.* **33** (2001) 47–56.
- [6] R. Markandeya, S. Nagarjuna, D.S. Sarma, Effect of Prior Cold Work on Age Hardening of Cu-3Ti-1Cr Alloy, *Mater. Charact.* **57** (2006) 348–357.
- [7] J.L. Johnson, R.M. German, Role of Solid-State Skeletal Sintering During Processing of Mo-Cu Composites, *Metall. Mater. Trans.* **32A** (2001) 605–613.
- [8] J.L. Johnson, R.M. German, Solid-State Contributions to Densification During Liquid-Phase Sintering, *Metall. Mater. Trans.* **27B** (1996) 901–909.
- [9] G.N. Romanov, P.P. Trasov, P.K. D'yachkovskiy, A.P. Savitskii, L.S. Martsunova, Liquid-Phase Sintering of Al with Addition of Ti, *Sci. Sinter.* **38** (2006) 55–62.
- [10] F. Lenel, *Powder Metallurgy Principles and Applications*, Princeton, USA, 1980, p. 210.
- [11] Đ. Drobnjak, *Fizička metalurgija – fizika čvrstoće i plastičnosti*, Tehnološko – metalurški fakultet, Beograd, 1990, s. 165.
- [12] K. Dies, *Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik*, Berlin/Heidelberg/New York, 1967, p. 192.
- [13] J.M. Vitek, H. Warlimont, The Mechanism of Anneal Hardening in Dilute Copper Alloys, *Metall. Trans.* **10A** (1979) 1889–1891.
- [14] S. Nestorović, D. Tančić, D. Marković, Influence of Deformation Degrees on the Anneal Hardening Effect in Sintered Copper Alloys, *Proceedings of the Tenth World Round Table Conference on Sintering*, Beograd, SANU, 2002, 259–263.
- [15] S. Nestorović, D. Tančić, D. Marković, Efekat ojačavanja žarenjem posle hladnog valjanja sinterovanih bakarnih legura, *Tehnika, RGM* **4-5** (2003) 5–8.

SUMMARY

CORRELATION BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL CHANGES OF THE SINTERED Cu-4 at% Ag ALLOY DURING THERMOMECHANICAL TREATMENT

(Scientific paper)

Ivana I. Rangelov, Svetlana D. Nestorović, Desimir D. Marković
Technical Faculty Bor, University of Belgrade, Bor, Serbia

Influence of thermomechanical treatment on microstructure and strength (hardness and microhardness) of the sintered copper based Cu-4 at% Ag alloy was investigated using Vickers hardness and microhardness measurements, and optical microscopy. After sintering at 790 °C, samples of Cu-4 at% Ag alloy were subjected to thermomechanical treatment by cold rolling with 20, 40 and 60% deformation degrees, and annealing below and over the recrystallization temperature. It was shown that microstructure of Cu-4 at% Ag alloy changed with thermomechanical treatment, which directly causes changes of mechanical properties. Optical microphotograph of the sintered Cu-4 at% Ag alloy shows relatively homogeneous structure with spherical pores presented. The strength (hardness and microhardness) of the sintered Cu-4 at% Ag alloy during cold rolling increases with deformation degree due to deformation strengthening. Maximum values of hardness and microhardness were for 60% deformation. The porosity still exists in spite of the fact that compacting was carried out during the cold rolling. The hardness and microhardness continue to increase after annealing at temperature below recrystallization temperature due to anneal hardening effect which occurs in a temperature range of 160–350 °C. It was concluded that solute segregation to dislocations, analogous to the formation of Cottrell atmosphere in interstitial solid solutions, is primarily responsible for anneal hardening phenomenon. Annealing at higher temperatures (higher than 400 °C) results in strength decrease due to beginning of alloy recrystallization.

Key words: Cu-4 at% Ag alloy •
Thermomechanical treatment •
Microstructure • Strength •

Ključne reči: Cu-4 at% Ag legura •
Termomehanička obrada •
Mikrostruktura • Ojačavanje •