

Efekat ojačavanja žarenjem hladno valjanih sinterovanih legura sistema Cu -Ag

Bakar i bakarne legure CuAg4at%, CuAg8at%, CuAg12at% su izrađeni tehnologijom metalurgije praha. Sinterovan bakar i sinterovane bakarne legure su podvrgnuti hladnom valjanju sa različitim stepenima deformacije 25, 50 i 75%. Hladno valjani sinterovani uzorci bakra i legure su podvrgnuti izohronom žarenju sve do temperature rekristalizacije uz merenje tvrdoće i elektroprovodljivosti.

Ova ispitivanja su dokazala pojavu efekta ojačavanja žarenjem kod sinterovanih bakarnih legura, koji se manifestovao znatnim porastom tvrdoće nakon žarenja hladno valjanih legura i to u temperaturnom intervalu od 180- 300°C.

Ključne reči: bakarne legure, efekat ojačavanja, sinterovanje, hladno valjani uzorci

1. UVOD

Bakar ima izvanrednu elektroprovodljivost, ali mu je mana što omekšava, tj. rekristališe na relativno niskim radnim temperaturama. Ovo predstavlja problem za konstruktore električnog pribora i drugih delova koji rade na povišenim temperaturama. Zbog toga se danas u svetu tehnologijom metalurgije praha izrađuju novi disperzno ojačani materijali na bakarnoj osnovi koji imaju bolje mehaničke osobine i znatno višu temperaturu rekristalizacije. u odnosu na čist bakar. Mehaničke osobine bakra se mogu znatno poboljšati legiranjem i nekim vidovima termomehaničke obrade [1,2].

Jedan od mehanizama koji znatno utiče na poboljšanje mehaničkih osobina bakarnih legura je ojačavanje žarenjem, koje se manifestuje kada se legura u hladno valjanom stanju žari na temperaturama od 150-300°C tj. ispod temperature rekristalizacije. Ovaj ojačavajući efekat je poznat kao *anneal hardening* i uglavnom je primenjen kod bakarnih legura kada se proizvodi elastičan materijal za elektro-mašinsku namenu i proučavan uglavnom kod livenih bakarnih legura [3,4]. Intenzitet ojačavanja raste sa porastom stepena prethodne deformacije i sa porastom koncentracije legirajućih elemenata. Ovu pojavu kod bakarnih legura karakteriše povećanje zatezne čvrstoće, tvrdoće i modula elastičnosti.

Našim prethodnim istraživanjima na raznim bakarnim legurama dobijenih tehnikom metalurgije

praha (MP) i ingot metalurgije (IM), potvrđena je pojava efekta ojačavanja žarenjem. Efekat se manifestovao znatnim porastom tvrdoće i čvrstoće nakon žarenja hladno valjanih legura u temperaturnom intervalu koji je ispod temperature rekristalizacije [5-11].

Predmet ovog rada bio je da se utvrdi uticaj legiranja I stepena deformacije pri hladnom valjanju na intenzitet ojačavanja, odnosno na efekat ojačavanja žarenjem kao I uticaj na povišenje temperature rekristalizacije kod legura u odnosu na čist bakar.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Tehnologijom metalurgije praha izrađeni su uzorci legura za ispitivanje i to: legura CuAg4at%, CuAg8at%, CuAg12at%. Radi upoređenja svojstva urađeni su i uzorci od čistog bakarnog praha. Kao osnova je korišćen elektrolitički bakarni prah. Mešanje prahova i presovanje dobijenih smeša je obavljeno u pogonu za sintermetalurgiju TIR-a u Boru. Presovanje je obavljeno na hidrauličnoj presi pri pritisku od 400 MPa u alatu pravougaonog poprečnog preseka standardnih dimenzija 30 x 12 x 6 mm. Sinterovanje je izvršeno u cevnoj peći u zaštitnoj atmosferi vodonika na temperaturi od 850°C za vreme od 1 sata. Nakon sinterovanja uzorci su dimenziono izmereni a zatim su podvrgnuti hladnom valjanju sa redukcijama od $\epsilon=25, 50, 75 \%$. Na hladno valjanim uzorcima su izmerene vrednosti tvrdoće i elektroprovodljivosti i posle toga,

Adresa autora: Svetlana Nestorović, Tehnički fakultet Bor, poštanski fax 50, Bor

uzorci su podvrgnuti izohronom žarenju u trajanju od 30 min, sa porastom temperature za po 20°C sve do temperature rekristalizacije, uz stalno praćenje promene tvrdoće i elektroprovodljivosti. Na svim uzorcima je obavljen metalografski pregled a karakteristični uzorci nakon sinterovanja, nakon hladnog valjanja i nakon žarenja su snimljeni. Sva ispitivanja su obavljena na Tehničkom fakultetu u Boru.

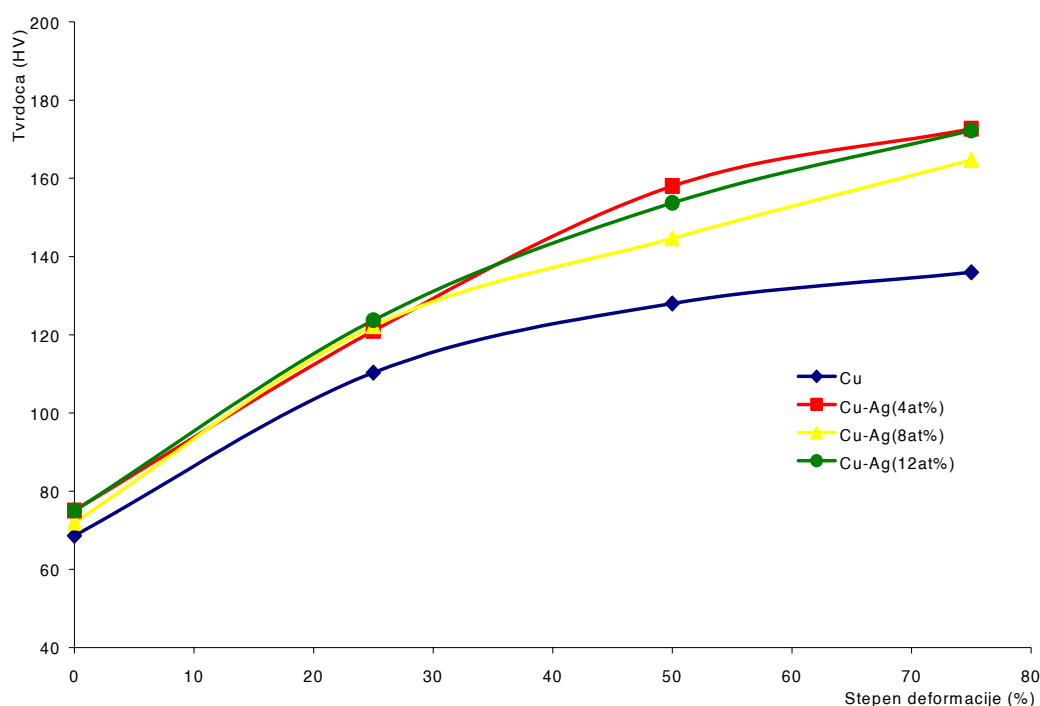
3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Hladno valjani sinterovani uzorci

Na slici 1 je dat dijagram ojačavanja, odnosno prikazana je zavisnost tvrdoće valjanih uzoraka od stepena deformacije pri hladnom valjanju. Pri valjanju sinterovanih uzoraka bakra i legura sa porastom stepena deformacije dolazi do deformacionog ojačavanja, što ima za posledicu porast tvrdoće. Veće vrednosti tvrdoće su dobijene za legure nego za čist bakar. Maksimalna vrednost

tvrdoće je za primenjene stepene deformacije od 75%. Stepent legiranja ne utiče bitno na intenzitet deformacionog ojačavanja, što proilazi iz činjenice da su sve tri krive ispitivanih legura međusobno veoma bliske.

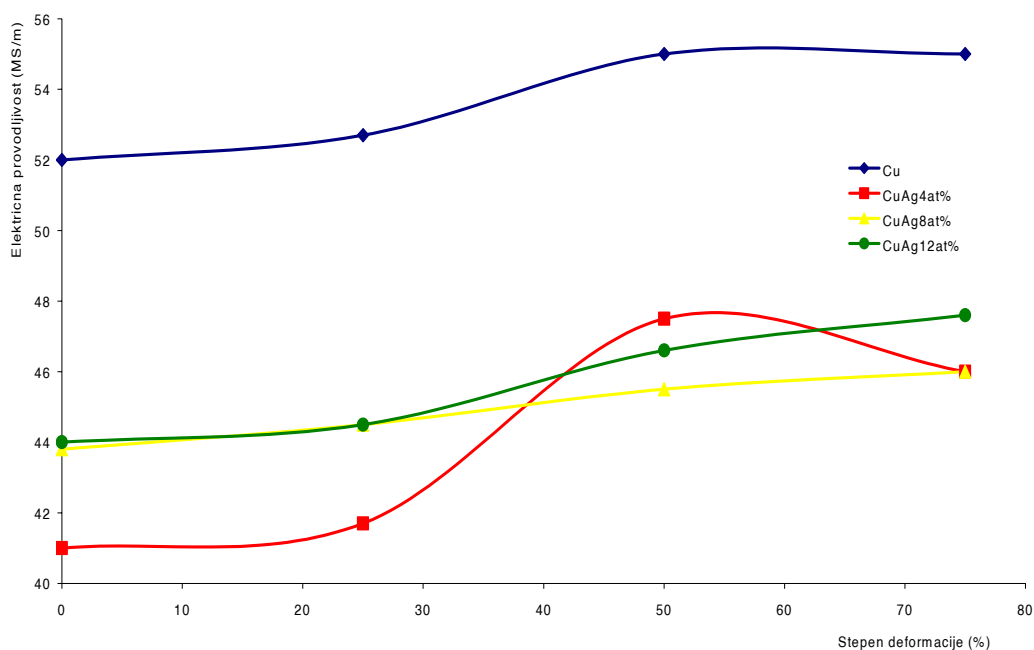
Na slici 2 je prikazana promena elektroprovodljivosti u zavisnosti od stepena deformacije nakon hladnog valjanja sinterovanih uzoraka bakra i legure. U procesu valjanja smanjuje se ili potpuno uklanja poroznost koja je cesto prisutna kod sinterovanih materijala, uslovljavajući porast elektroprovodljivosti [9]. S druge strane, legiranjem bakra smanjuje se ova osobina i smanjenje je izrazenije, što je sadržaj legirajućeg elementa veći (slika 2). Međutim, deformišući legure hladnim valjanjem elektroprovodljivost se može povećati u određenom stepenu, pri čemu se najviše vrednosti dobijaju kod legure sa najvišim procentom srebra (pri $\varepsilon = 50\%$).



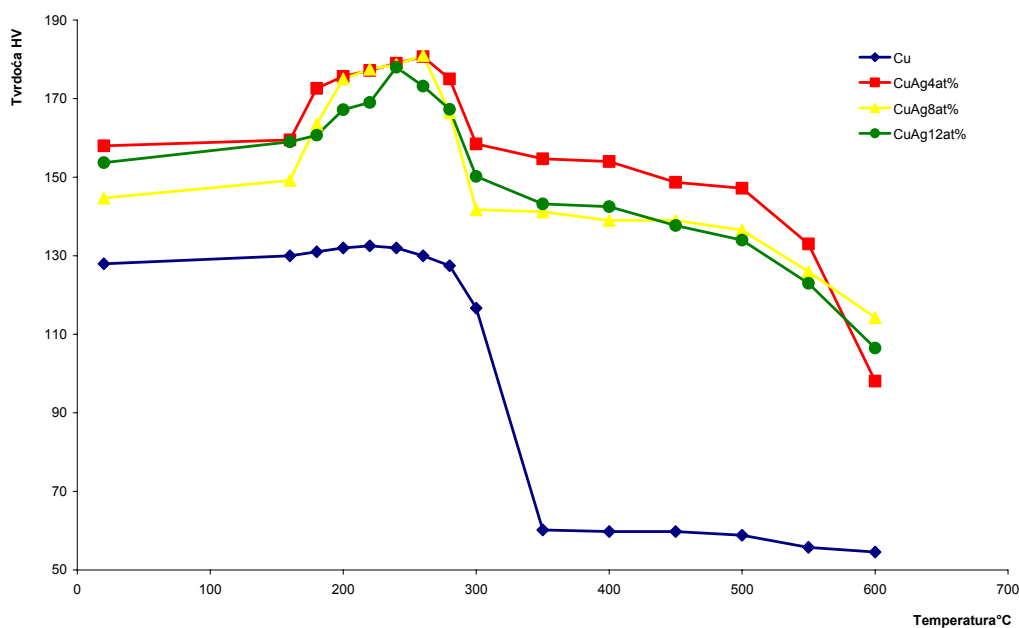
Slika 1 - Zavisnost tvrdoće od stepena deformacije pri hladnom valjanju

3.2. Žareni hladnovaljani sinterovani uzorci

Nakon hladnog valjanja svi uzorci bakra i legura su podvrgnuti izohronom žarenju, u trajanju od po 30 min. Na slici 3 je prikazan dijagram promene tvrdoće hladno valjanih uzoraka bakra i legura ($\varepsilon = 50\%$) sa porastom temperature žarenja.



Slika 2 - Zavisnost elektroprovodljivosti od stepena deformacije pri hladnom valjanju



Slika 3 - Zavisnost tvrdoće od temperature žarenja za hladno valjane uzorke ($\epsilon = 50\%$)

Može se uočiti da tvrdoća bakra opada iznad 280°C , dok je tvrdoća kod svih legura porasla u odnosu na hladno deformisano stanje, što znači da je kod bakra došlo do rekristalizacije, što nije slučaj kod legura. Kod legura dolazi do porasta tvrdoće iznad 160°C , i taj trend se zadržava sve do 300°C (znači javio se efekat ojačavanja žarenjem), a zatim dolazi do neznatnog opadanja tvrdoće čije vrednosti su i dalje visoke jer su na nivou za hladno deformisano stanje, t.j. nije još došlo do

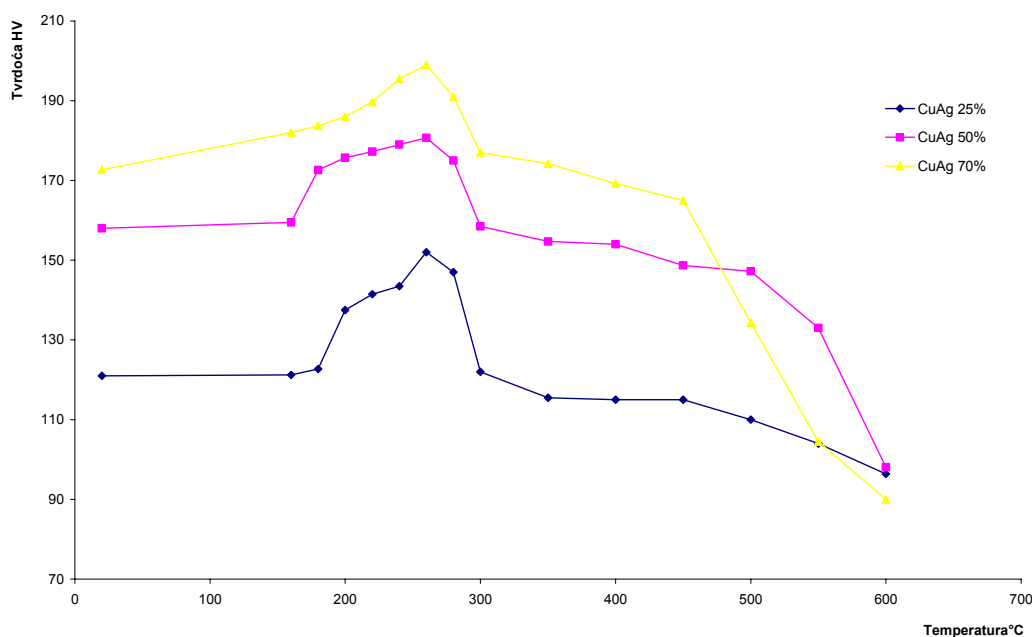
rekristalizacije legura. Na račun pojave efekta ojačavanja žarenjem najveći porast tvrdoće je kod legure CuAg4at% i iznosi 22,7HV i ostvaren je na temperaturi žarenja 260°C . Kod legure CuAg8at% najveći porast tvrdoće je 36,3HV i ostvaren je na temperaturi žarenja 260°C . Kod legure CuAg12at% najveći porast tvrdoće je 24 HV i ostvaren je na temperaturi žarenja 240°C . Znači da kod svih ispitivanih legura u temperaturnom intervalu od 160 do 300°C tvrdoća poraste za 20-30 HV, na

račun pojave efekta ojačavanja žarenjem. Nakon toga vrednosti tvrdoće se smanje, ali su i dalje na visokom nivou, tako da sa dijagrama sl.3. se može uočiti da vrednosti tvrdoće opadaju tek iznad 500°C , što znači da je tek tada došlo do potpune rekristalizacije legure.

Na osnovu prikazanih rezultata može se konstatovati da je kod svih ispitivanih legura došlo do pojave efekta ojačavanja žarenjem, koji je najizraženiji za primenjen stepen deformacije od 50% i iznosi 36.3HV za leguru sa 8at%Ag. Za istu leguru za primenjen stepen deformacije od 75% porast tvrdoće iznosi 50HV. Ovaj efekat je pre-

težno proučavan kod dvonih livenih bakarnih legura koje sadrže Al, Ni, Au, Ga, Pd, Rh and Zn [3,4]. Ovu pojavu kod bakarnih legura karakteriše povećanje zatezne čvrstoće, tvrdoće i modula elastičnosti. Dobijeni rezultati navode na hipotezu da su segregacije rastvorenih atoma legirajućih elemenata oko dislokacija unetih deformacijom, analogno formiranju Cottrell-ovih atmosfera kod intersticijskih čvrstih rastvora, primarno odgovorne za efekat ojačavanja žarenjem [3,4].

Na slici 4 data je zavisnost tvrdoće hladno valjane legure CuAg4at% (hladno valjane stepenima deformacije 25, 50, 75%) od temperature žarenja.



Slika 4 - Zavisnost tvrdoće hladno valjane legure CuAg4at% od temperature žarenja

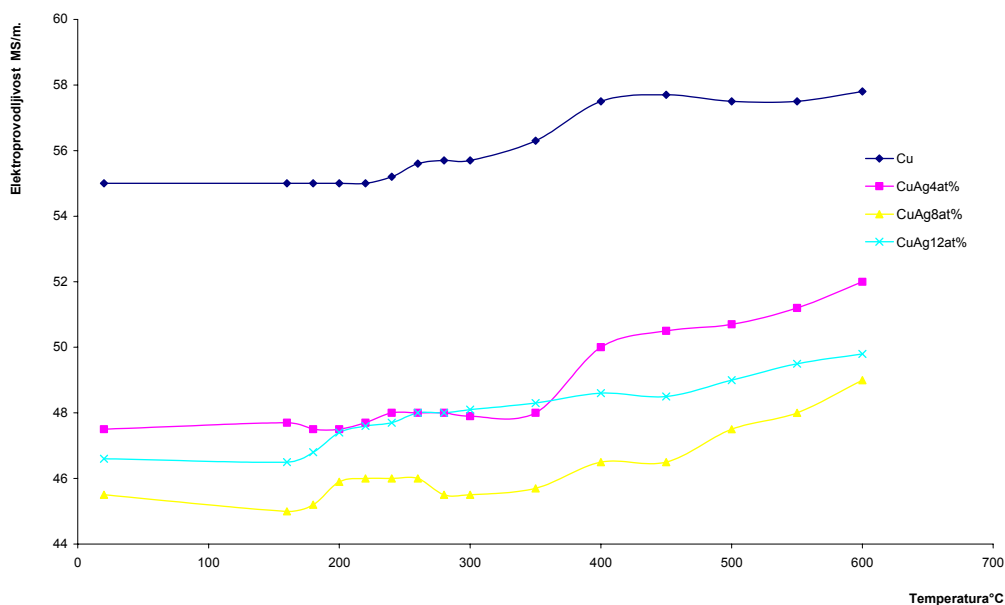
Sa dijagrama slika 4 se vidi da za sve primenjene stepene deformacije pri hladnom valjanju, postoji intenzivan porast tvrdoće, u temperaturnom intervalu od $160-300^{\circ}\text{C}$, iznad tog temperaturnog intervala zadržava se nivo vrednosti tvrdoće (izmerenih na sobnoj temperaturi) sve do 500°C , tj. do temperature rekristalizacije kada dolazi do naglog pada ove osobine. Može se reći da legirajući elementi jako utiču na povišenje temperature rekristalizacije.

Na osnovu dijagrama na slike 3 i 4, može se reći da intenzitet ojačavanja raste sa porastom stepena prethodne deformacije i sa porastom koncentracije legirajućih elemenata.

Na slici 5 je prikazana zavisnost elektroprovodljivosti od temperature žarenja nakon hladnog valjanja sinterovanih uzoraka. Vidi se da je elektroprovodljivost kod legura znatno niža od elek-

troprovodljivosti za čist bakar. Takođe se uočava da elektroprovodljivost neznatno raste baš u temperaturnom intervalu u kom se javlja i efekat ojačavanja žarenjem. Do sličnih zaključaka je došao i Bader [3] sa saradnicima preko merenja električnog otpora. Elektroprovodljivost neznatno raste kod svih uzoraka nakon rekristalizacije metala i legura.

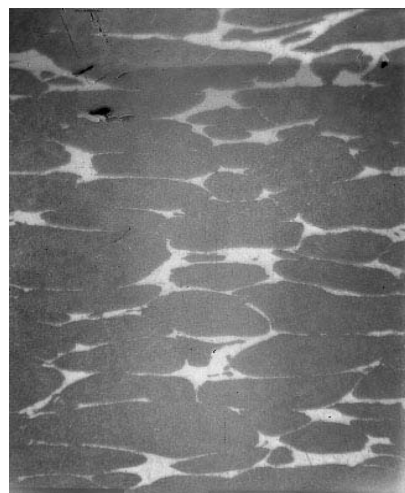
Na slikama 6, 7 i 8 su prikazane mikrostrukture sinterovanih uzorka legure CuAg4at%, CuAg8at% i CuAg12at% nakon hladnog valjanja stepenom deformacije od 50%. Može se uočiti da je došlo do deformacije zrna, koja su izdužena u pravcu valjanja. Takođe se uočava da je u strukturi još prisutna izvesna poroznost i pored toga što je došlo do kompaktiranja sinterovane legure tokom procesa valjanja, što se sigurno negativno reflektovalo na dobijene vrednosti elektroprovodljivosti.



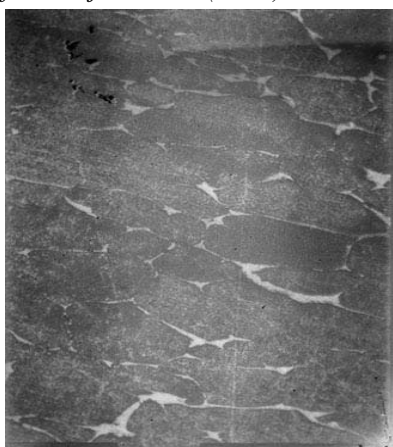
Slika 5 - Zavisnost elektropovodljivosti hladno valjanih uzoraka od temperature žarenja ($\epsilon=50\%$)



Slika 6 - Detalj mikrostrukture sinterovanog uzorka CuAg4at% nakon hladnog valjanja stepenom deformacije $\epsilon=50\%$, (300X).



Slika 8 - Detalj mikrostrukture sinterovanog uzorka CuAg12at% nakon hladnog valjanja stepenom deformacije $\epsilon = 50\%$, (300X)



Slika 7 - Detalj mikrostrukture sinterovanog uzorka CuAg8at% nakon hladnog valjanja stepenom deformacije $\epsilon = 50\%$, 300X

4. ZAKLJUČAK

Nakon sprovedenih eksperimenata i dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Legirajući element srebro ima znatan uticaj na povišenje temperature rekristalizacije kod hladno valjanih sinterovanih bakarnih legura.
- Efekat ojačavanja žarenjem se javio kod svih ispitivanih uzoraka u temperaturnom intervalu žarenja od 160-300°C.
- Efekat ojačavanja žarenjem se javio za sve primenjene stepene deformacije a najizraženiji je za najveći stepen redukcije pri valjanju od 75%.

Rezultati prikazani u radu ukazuju na mogućnost primene efekta ojačavanja žarenjem kod sinterovanih bakarnih legura sistema Cu-Ag, a samim tim i na mogućnost proširenja upotrebe ovih bakarnih legura

LITERATURA

- [1] S. S. Salkova, T. V. Pisarenko i dr. Poroškovaja metallurgija, 9(1991)88.
- [2] R. Z. Vlasjuk i dr, Poroškovaja metallurgija, 4 (1989),43.
- [3] M. Bader, G. T. Eldis and H. Warlimont, Metall. Trans. 7A(1976)249.
- [4] J. M. Vitek and H. Warlimont, Metall. Trans. 10A (1979),1889.
- [5] S. Nestorović, D. Marković, VI Jug. simp. o metalurgiji, V. Banja, 1996, 710.
- [6] S. Nestorović, D. Marković, B. Stanojević, Metalurgija, 3,4 (1997)297.
- [7] S. Nestorović, D. Marković, XXIX Oktobarsko savetovanje, Bor, 1997, 674.
- [8] S. Nestorovic, D. Marković, Advanced Science and Technology of Sintering, Plenum Publishing Corporation, New York, 1999, Edited by B.D. Stojanović et all. 1999, p 617-622.
- [9] S. Nestorović and D. Marković, Materials Transaction, JIM, V40, 3(1999)222.
- [10] S. Nestorovic and D. Tančić, European Congress and Exhibition on Powder Metallurgy, Nice, France, 2001, Proceedings, V2, p 158-164.
- [11] S. Nestorovic, B. Milićević, D. Marković, Science of sintering, Vol.34, N2(2002) 169-174.

ABSTRACT

ANNEAL HARDENING EFFECT OF COLD ROLLED SINTERED COPPER ALLOYS OF SYSTEM CU - AG

Copper and copper alloys CuAg4at%, CuAg8at% and CuAg12at% were prepared by a powder metallurgical method. Sintered copper and copper alloys were subjected to cold rolling with different degrees of deformation. The copper and copper alloys in the cold-rolled state was isochronally annealed up to the recrystallization temperature during which the hardness and electrical conductivity was measure These investigations show that anneal hardening effect occurs in a temperature range of 160- 300^oC where the values of hardness increases.

Key words: *copper alloys, sintering, cold rolling, hardening effect*