

# Utjecaj hladnog gnječenja na svojstva disperzivno očvrsnute AlCu legure

*Zoran Kurelić*

Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, Hrvatska  
[zoran.kurelic@st.t-com.hr](mailto:zoran.kurelic@st.t-com.hr)

*Igor Gabrić*

Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, Hrvatska  
[igabric@oss.unsist.hr](mailto:igabric@oss.unsist.hr)

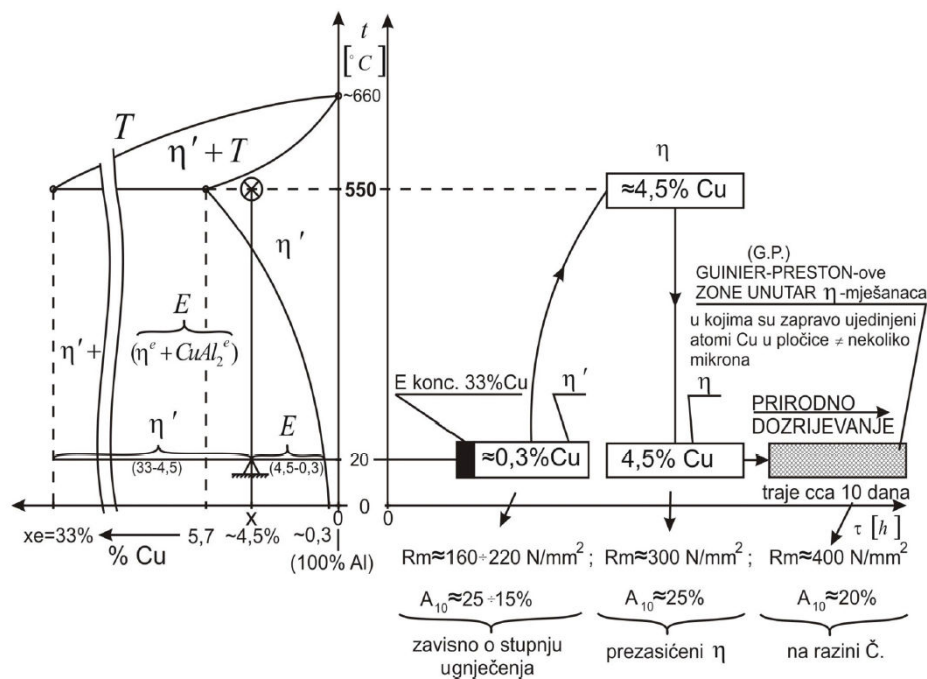
**Sažetak.** Toplinski očvrstivim aluminijskim legurama porast čvrstoće i tvrdoće se postiže precipitacijskim očvršćivanjem. U ovom radu je ispitana mogućnost utjecaja hladnog gnječenja, kao međufaze postupka očvršćivanja, s ciljem poboljšavanja konačnih mehaničkih svojstva (tvrdoća, čvrstoća). Pretpostavka je da se hladnim gnječenjem, ukoliko se obavi nakon gašenja, a prije prirodnog ili umjetnog dozrijevanja, može povoljno utjecati na mehanička svojstva. Ova pretpostavka je ispitana pokusom. Plan pokusa je određen korištenjem programskog paketa „Desing expert“. Vrijeme držanja uzorka i temperatura rastvaranja bakra u rešetki aluminijske legure su bili jednaki za sve uzorke. U pokusu su varirane tri varijable: stupanj ugnječenja prije dozrijevanja, temperatura na kojoj se vrši dozrijevanje i vrijeme trajanja dozrijevanja. Odzivna veličina pokusa je tvrdoća nakon završenog dozrijevanja. Dobiveni rezultati su statistički obrađeni metodom analize varijance.

**Ključne riječi:** *Aluminijske slitine, precipitacijsko očvršćivanje, tvrdoća, deformacija*

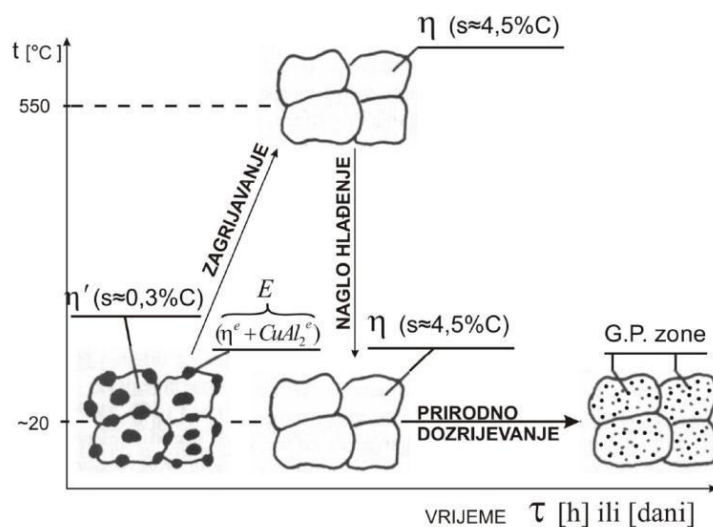
## 1. Uvod

Očvrstivost koja se postiže toplinskom obradom ne počiva na principu modifikacije rešetke već na promjeni rastvorivosti legiranih elemenata u rešetki aluminijske legure. Na primjeru binarnog dijagrama slijevanja Al-Cu na slici 1 prikazane su promjene koje se odvijaju tijekom toplinske obrade [1].

Za predviđenu toplinsku obradu očvršćivanja uzima se legura iz heterogenog područja dijagrama koja zagrijavanjem prelazi u homogeno područje (do ove pojave dolazi zbog povećanja rastvorivosti legiranih elemenata u rešetki aluminijske legure na povišenim temperaturama). Teži se odabiru legura maksimalne koncentracije čija se struktura zagrijavanjem može dovesti u homogeno područje (dakle maksimalne rastvorivosti atoma bakra u rešetki aluminijske legure na eutektičkoj temperaturi). Početno stanje je heterogena struktura ( $\eta^e + CuAl_2^e$ ). Koncentracija mješavine je 0,3 %Cu, a eutektikuma 33 %Cu. Eutektikum je izlučen po granicama mješavine kao i unutar samih mješavina. Toplinska obrada se sastoji od zagrijavanja na temperaturu na kojoj je struktura homogena kako bi mješavina mogao u svojoj rešetki rastvoriti cjelokupnu količinu bakra. Naglim hlađenjem sprječava se difuzija, a u strukturi se dobiju  $\eta'$  prezasićeni mješanci s 4,5 %Cu. Zbog velike prezasićenosti rešetka je izvitoperena pa i čvrstoća ove legure poraste s početne vrijednosti 160 – 220 N/mm<sup>2</sup> na N/mm<sup>2</sup>.



**Slika 1** Dijagram sljevanja i promjene nastale toplinskom obradom precipitacijskog očvršćavanja[1]  
 Kako ovo stanje ne odgovara ravnotežnom  $\eta'$  mješancu teži vraćanju u ravnotežno stanje.



**Slika 2** Promjene faza pri toplinskoj obradi duraluminija

Difuzijom nakon hlađenja dio atoma bakra napušta mjesta na kojima je gašenjem zadržan. Guinier-Prestonove zone, slika 2, nastaju zbog mikronehomogenosti unutar mješancu, iako se sami mješanci mogu smatrati homogenima. Na područjima reda veličine stotinjak atoma znatne su razlike u koncentracijama. Difuzijom se stvaraju slojevi samih bakrenih atoma. Ovakve pločice veličine nekoliko mikrona gusto su raspršene u mješancima te remete pravilnost kliznih ravnina povećavajući čvrstoću legure (prirodno dozrijevanje). S obziroma da se difuzija dešava na nižim temperaturama odvija se sporo i nepotpuna je, pa nastaju samo Guinier-Prestonove zone. Nakon dozrijevanja (naknadna difuzija) od desetak dana legura dostiže konačna svojstva koja se više ne mijenjaju. Ako se dozrijevanje vrši na višim temperaturama 100 – 200 °C (umjetno dozrijevanje) dolazi do potpunije difuzije tj.

uspostavlja se ravnoteža. Dozrijevanjem u kraćem vremenskom periodu (do 100 sati) dobije se  $\Theta''$  faze (eutektički kristali intermetalnog spoja  $\text{CuAl}_2$ ) kada je čvrstoća najviša. Duljim dozrijevanjem kao i povećanjem temperature samog dozrijevanja intermetalni spoj se okrupnjava, te nastaje  $\Theta'$  faza, a čvrstoća počinje opadati. Kako je cilj obrade maksimalna čvrstoća, nastoji se izbjeći pojava  $\Theta'$  faze.

## 2. Planiranje pokusa

Pretpostavka je da se hladnim gnječenjem, (ukoliko se obavi nakon gašenja, a prije prirodnog ili umjetnog dozrijevanja) može povoljno utjecati na mehanička svojstva. Ova pretpostavka je ispitana pokusom.

### 2.1. Odabir materijala i ostalih parametara pokusa

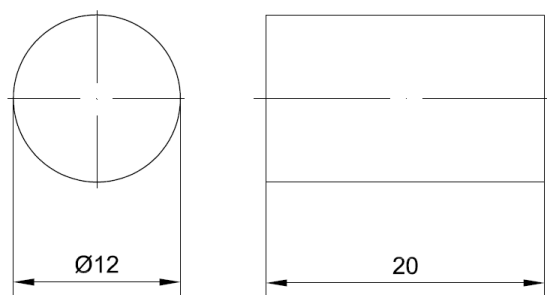
Odabrani materijal je AlCuBiPb, odnosno ASTM 2011, kemijskog sastava prema tablici 1[4]

**Tablica 1** Kemijski sastav legure EN AlCuBiPb (ASTM 2011)

Al	Bi	Cu	Fe	Pb

Ostali pojedinačno	Ostali ukupno	Si	Zn

Odabrani dizajn epruvete s različitim stupnjevima deformacije (slike 3 i 4):



**Slika 3** Dimenzije epruveta



**Slika 4** Označene epruvete s različitim stupnjevima deformacije

Dimenzija epruvete:

Temperatura rastvornog žarenja: [2]

Trajanje rastvornog žarenja: min(na min) [7]

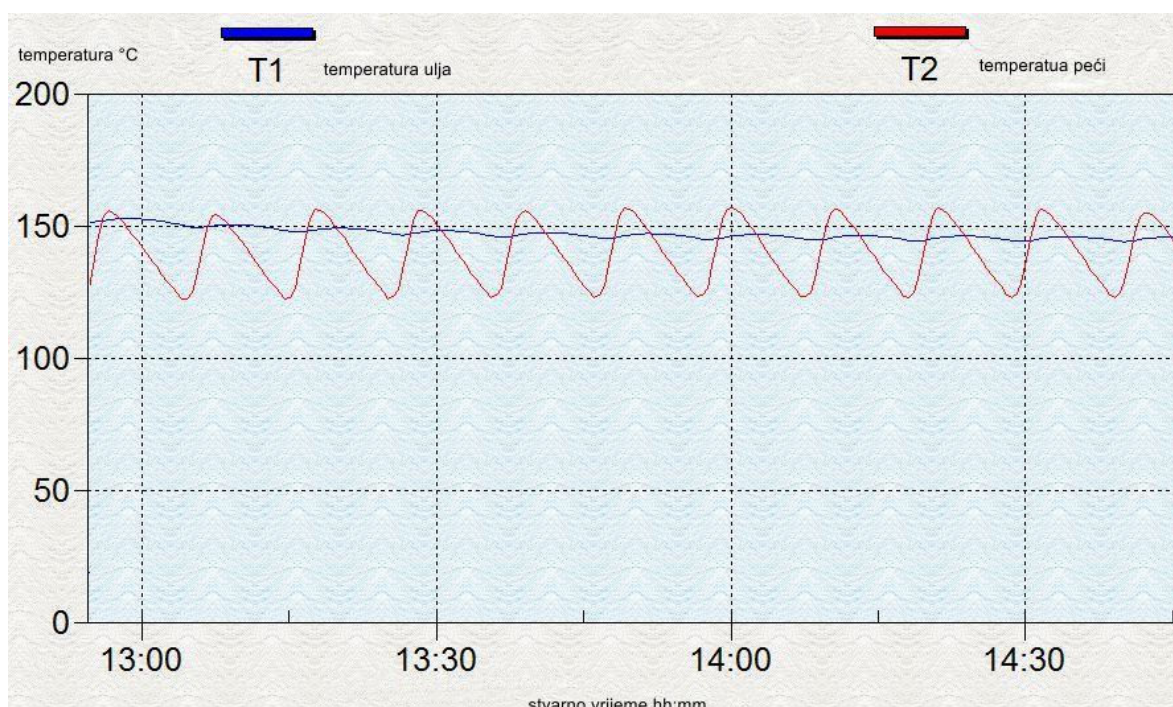
Maksimalno vrijeme izvan peći nakon rastvornog žarenja, a prije gašenja [7]

Preporučena temperatura dozrijevanja [2]

Preporučeno trajanje dozrijevanja [2]

Obzirom na veliku temperaturnu histerezu peći u samu peć je stavljena posuda sa 1 litrom repičinog ulja s ciljem smanjenja temperaturne histereze. Na slici 5 su prikazane temperaturne histereze i to crvenom bojom oscilacija temperature unutar peći, a plavom unutar uljne kupke.

Dozrijevanje je provedeno držanjem uzoraka u uljnoj kupki.



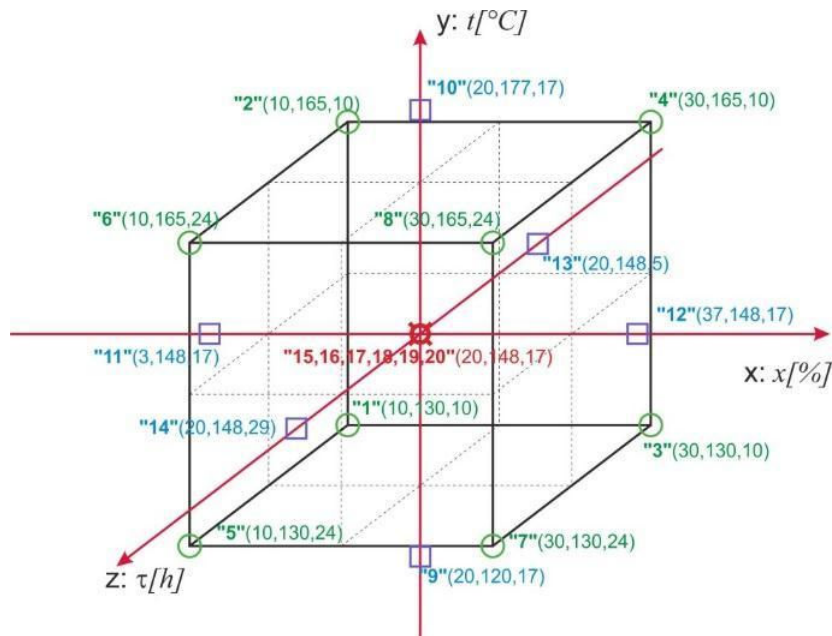
Slika 5 Promjena temperature peći i uljne kupke [5]

### 3. Centralno kompozitni plan pokusa

U svrhu planiranja odabran je Centralni kompozitni plan pokusa (central composite design, CCD) [6]. Svaki faktor je mijenjan na pet razina. Svrha ovakvog pristupa planiranju pokusa je pronalaženje matematičkog modela koji opisuje proces uz minimalan broj potrebnih pokusa. U ovom slučaju mijenjana su tri parametra (vrijeme dozrijevanja, temperatura dozrijevanja i stupanj deformacije). Svaki parametar mijenjan je na 5 nivoa ( $+\alpha$ ;  $-\alpha$ ;  $+1$ ;  $-1$ ;  $0$ ).

Na slici 6 prikazana je shema eksperimentalnih točaka pokusa. Simbol  $\boxtimes$  označava centralnu točku gdje razina svakog faktora ima srednju vrijednost, a koja se ponavlja 6 puta. Ovim ponavljanjem se postiže smanjenje varijance i dobra procjena čiste greške. Simbol  $\square$  označava 6 aksijalnih točaka udaljenih  $\alpha$  od središta, a simbol  $\circ$  označava 8 vršnih točaka plana pokusa.

Odzivna veličina dobivena pokusom je tvrdoća. Rezultati mjerenja tvrdoća su statistički obrađeni pomoću Design Expert softvera [3], te je pomoću navedenog programa određen i matematički model.



Oznaka:npr. "6"(10,165,24) - epruveta br.6 (deformacija 10%, temperatura 165°C, dozrijevanje 24 sata)

Slika 6 Shema eksperimentalnih točaka pokusa

Prvi korak kod statističke analize je bilo određivanje vrste transformacije odzivne veličine. Obzirom na dobivene rezultate nije bilo potrebe za transformacijom. U slijedećem koraku program upućuje na funkciju koja najbolje opisuje pojavu – u ovom slučaju polinom 2. reda. Rezultati analize varijance prikazani su u tablici 2.

F-vrijednost modela od 3,008 ukazuje na značajnost modela jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost odstupanja od modela uslijed šuma iznosi samo 4,94 %. Vrijednost "Prob > F" manja od 0,05 % za pojedine članove predloženog matematičkog modela govori u prilog značajnosti njihovog utjecaja. U ovom modelu je značajna vrijednost faktor B (temperatura). F - vrijednost veličine odstupanja od modela od 3,23 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na čistu grešku. Postoji vjerojatnost od 13,62 % tako velike F-vrijednosti. Odstupanje od modela nastaje zbog šuma. S obzirom da odstupanje od modela nije značajno, model je prihvaćen i dalje analiziran. Matematički model s stvarnim faktorima dan je izrazom:

(1)

gdje je

Tablica 2 Analiza varijance

Tablica analize varijance						
Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	P-Vrijednost Prob>F	Značajnost
Model	964,8182	6	160,803	3,007525	0.0494	značajan
A	185,3851	1	185,3851	3,467288	0.0873	
B	281,1426	1	281,1426	5,258254	0.0407	
C	33,0954	1	33,0954	0,618988	0.4467	

C <sup>2</sup>	45,8381	1	45,8381	0,857317	0.3727	
AB	178,7477	1	178,7477	3,343147	0.0924	
AC	190,8124	1	190,8124	3,568794	0.0833	
Ostatak	641,6029	12	53,46691			
Odstupanje od modela	555,6029	8	69,45036	3,230249	0.1362	neznačajan
Čista greška	86	4	21,5			
	1606,421	18				

Pomoću Design-expert softwera [3] generirano je 20 stanja pokusa prikazanih u tablici 3 i na slici 6.

**Tablica 3** Stanja pokusa, izmjerena i očekivana tvrdoća

Uzorak	Test broj	Stupanj deformacije %	Temperatura °C	Vrijeme držanja h	Izmjerena tvrdoća HB <sub>30</sub>	Očekivana tvrdoća HB <sub>30</sub>
P	1	19	150	17	91	87,59
D	2	29	165	10	77	83,27
E	3	9	130	24	72	66,78
I	4	5	150	17	75	83,15
K	5	18	120	17	86	76,80
G	6	11	165	24	91	88,22
U	7	19	150	17	81	87,59
T	8	19	150	17	82	87,59
F	9	30	130	24	89	94,86
N	10	18	150	29	81	82,23
J	11	35	150	17	103	92,67
S	12	19	150	17	89	87,59
A	13	8	130	10	69	73,64
O	14	20	150	17	89	87,91
H	15	30	165	24	96	95,85
B	16	29	130	10	77	81,34
C	17	10	165	10	103	94,08
L	18	20	180	17		
R	19	19	150	17	82	87,59
M	20	19	150	9	89	83,26

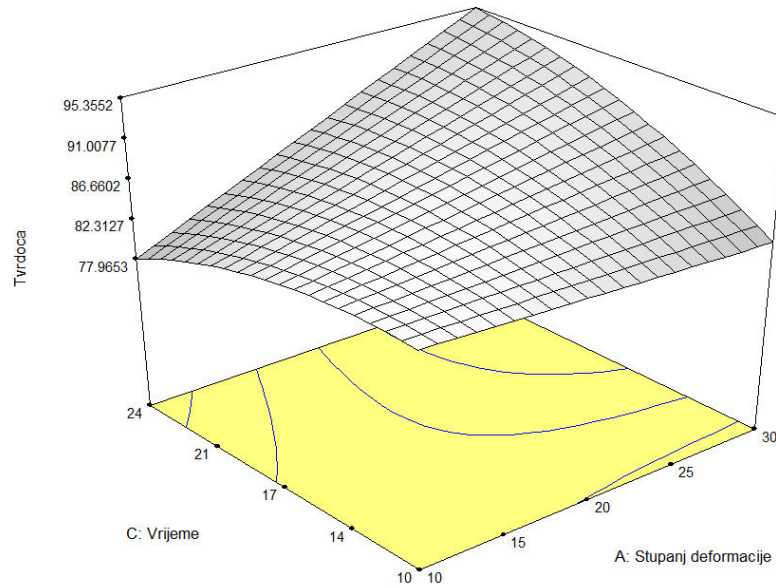
Uzorak L odstupio je od zakonitosti te eliminiran iz daljnjeg razmatranja. Matematički model se dobro podudara sa mjerenjem dobivenim vrijednostima.

Iz dijagrama na slici 7 vidljivo je da pri niskim vrijednostim stupnjeva deformacije dulje trajanje dozrijevanja obara tvrdoću materijala nakon obrade. Pri većim stupnjevima deformacije produljenje trajanja dozrijevanja rezultira povećanjem tvrdoće, a time i čvrstoće, nakon obrade. Za kratka vremena držanja na temperaturi dozrijevanja stupanj deformacije nije pokazao veliki utjecaj na dobivenu tvrdoću, dok je kod duljeg trajanja ovaj utjecaj velik.

DESIGN-EXPERT Plot

Tvrdoća  
X = A: Stupanj deformacije  
Y = C: Vrijeme

Actual Factor  
B: Temperatura = 148



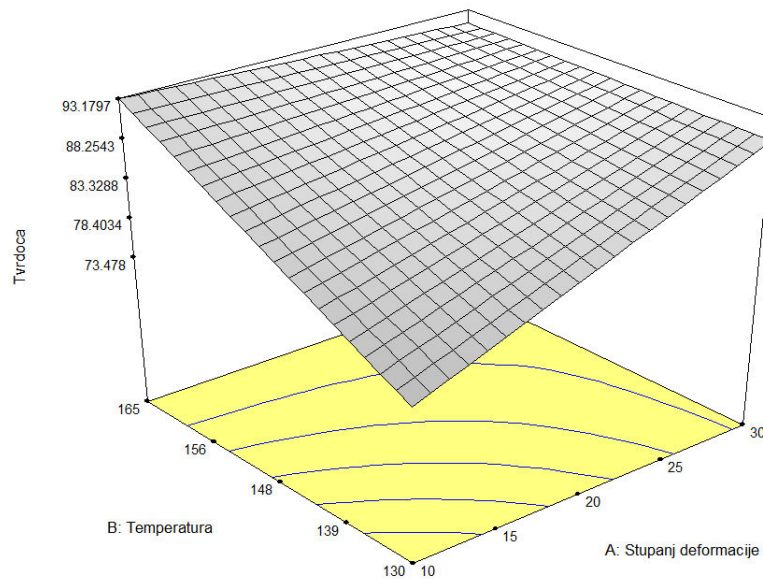
**Slika 7** Prikaz utjecaja promjene temperature na tvrdoću

Kod nižih temperatura promatranog intervala veliki je utjecaj stupnja deformacije na tvrdoću, slika 8. Tvrdoća u ovom slučaju raste povećanjem stupnja deformacije. Pri višim temperaturama dozrijevanja postižu se maksimalne vrijednosti tvrdoće, te stupanj deformacije prije dozrijevanja nema bitnog utjecaja na konačnu tvrdoću.

DESIGN-EXPERT Plot

Tvrdoća  
X = A: Stupanj deformacije  
Y = B: Temperatura

Actual Factor  
C: Vrijeme = 17



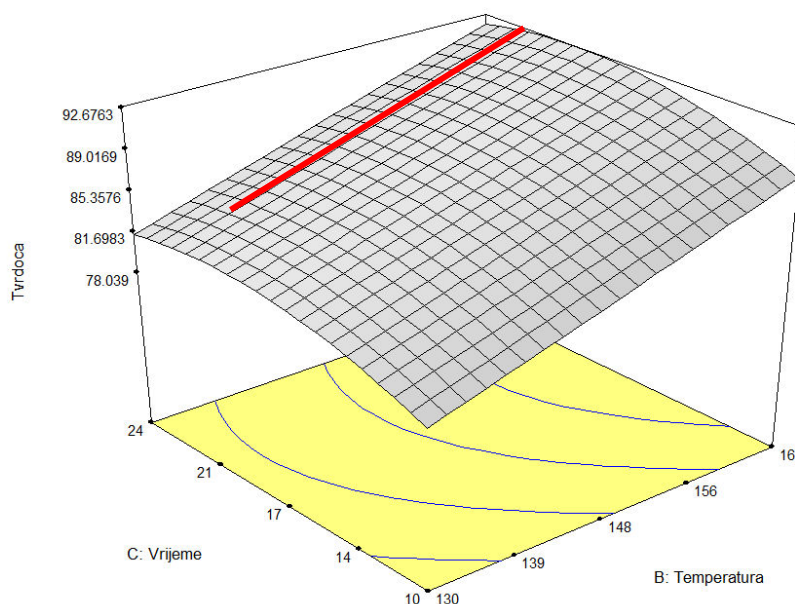
**Slika 8** Prikaz utjecaja promjene vremena dozrijevanja na tvrdoću

Iz dijagrama na slici 9 očito je da postoji optimalno vrijeme držanja za koje se postiže maksimalna vrijednost tvrdoće nakon obrade. Crvena linija na slici povezuje vrijednosti maksimalne tvrdoće za različite temperature dozrijevanja. Ovo vrijeme držanja iznosi između 16 i 19 sati. Povećanje temperature dozrijevanja u promatranom intervalu djeluje povoljno na tvrdoću nakon obrade. Maksimalna tvrdoća se postiže za maksimalnu temperaturu tj. 165°C.

DESIGN-EXPERT Plot

Tvrdoća  
X = B: Temperatura  
Y = C: Vrijeme

Actual Factor  
A: Stupanj deformacije = 20



Slika 9 Prikaz utjecaja promjene stupnja deformacije na tvrdoću

#### 4. Naknadni pokus

Iz dijagrama na slikama 7, 8 i 9 vidljivo je da pokus nije dao očekivane rezultate maksimalnih tvrdoća. Zbog rezultata koji su dobiveni naknadno je toplinski obrađen još jedan uzorak. Prije toplinske obrade disperzivnog očvršćavanja uzorak je omekšavajuće žaren na temperaturi od u trajanju od minuta nakon čega je polagano ohlađen u ugašenoj peći. Tvrdoća nakon žarenja je iznosila HV. Uzorak je ponovno zagrijan na temperaturu rastvornog žarenja u trajanju od 75 minuta te gašen u vodi. Tako toplinski obrađenom uzorku izmjerena je tvrdoća od HV. Nakon rastvornog žarenja provedeno je umjetno dozrijevanje na temperaturi od u trajanju od 14 sati, a izmjerena tvrdoća očvrstnutog uzorka je iznosila HV. Vidljivo je da je polazna struktura ispitivanog materijala značajno utjecala na rezultate pokusa.

#### 5. Zaključak

Dobiveni rezultati opisani matematičkim modelom pokazuju određene zakonitosti promjene tvrdoće u funkciji stupnja deformacije prije obrade, temperature i trajanja precipitacijskog dozrijevanja. Kako su dobivene vrijednosti tvrdoće znatno niži od očekivanih proveden je naknadni pokus koji je ukazao na utjecaj ishodne strukture na rezultate provedene obrade. Zbog ovog razloga dobivenim rezultatima treba pristupiti sa određenom rezervom. Bilo bi dobro ponoviti cjelokupno istraživanje uz prethodno omekšavajuće žarenje uzorka kako bi se eventualno potvrdila dobivena zakonitost. Ispitivanje bi se moglo proširiti i na utjecaj stupnja ugnječanja prije rastvornog žarenja na rezultate toplinske obrade (iz dobivenih rezultata može se naslutiti da hladna deformacija prije toplinske obrade umanjuje njezin efekt). Dobiveni rezultati su samo izviđačkog karaktera i smjernica su za daljnja istraživanja.

#### Reference

[1] Romeo Deželić: Metali 2, Sveučilište u Splitu, FESB, SPLIT 1987



- [2] Web stranica: <http://www.matweb.com/http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8c05024423d64aaab0148295c5a57067>
- [3] Stat Ease Inc.: DESIGN – EXPERT v.6.0.10. Minneapolis. MN 55413
- [4] Laurens Katgerman and D. Eskin: Hardening, Annealing, and Aging; Handbook of Aluminum, Volume 7, Physical Metallurgy and Processes
- [5] Four Channel Thermometar software
- [6] J. Stanić: Metod inženjerskih mjerenja, MAŠINSKI FAKULTET Beograd 1986
- [7] C. R. Brooks: Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys, American Society for Metals, 1982

## **Influence of Cold Deformation on Properties of Alcu Alloy Hardened by Dispersion**

*Zoran Kurelić*

University of Split, University Department of Professional Studies, Split, Croatia  
[zoran.kurelic@st.t-com.hr](mailto:zoran.kurelic@st.t-com.hr)

*Igor Gabrić*

University of Split, University Department of Professional Studies, Split, Croatia  
[igabric@oss.unsist.hr](mailto:igabric@oss.unsist.hr)

**Abstract.** Heat treatable aluminum alloys increase in strength and hardness is achieved by precipitation hardening. In this thesis, the possibility of cold deformation influence, as interphase of hardening process, in order to improve the final mechanical properties (hardness, strength) is observed. The premise is that the cold deformation, if done after quenching and before natural or artificial aging, may favorably affect the mechanical properties. This premise was tested experimentally. The plan of the experiment was determined using the software package "Desing expert". The aging time of the samples and the solution annealing temperature were the same for all samples. In the experiment three variables were altered: the degree of deformation before aging, the temperature and duration of aging process. Response value of the experiment is hardness after completion of aging process. The results were statistically analyzed using analysis of variance.

**Key words:** *Aluminium alloys, precipitation hardening, hardness, deformation*