

# Optimizacija režima starenja legura na aluminijumskoj osnovi

Svetlana Lj. Ivanov, Ljubica S. Ivanić, Dragoslav M. Gusković, Srba A. Mladenović

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Republika Srbija

## Izvod

U ovom radu glavni zadatak istraživanja sastojao se u analizi strukturnog stanja koja nastaju, kao i praćenju promena mehaničkih osobina AlCu5PbBi legure posle termičke obrade starenjem, radi određivanja optimalnih uslova otvrđnjavanja legure. Pojedine mehaničke osobine različito se menjaju pod uticajem strukturalnih promena pri taloženju. U radu je analizirana i primenjena metoda simpleks rešetke za optimizaciju režima procesa starenja AlCu5PbBi legure. Na osnovu zadatih režima starenja i praćenja promena mehaničkih osobina legure, matematičkim modeliranjem, konstruisane su izolinije osobina u koordinatama temperatura-vreme starenja. Kao matematički model korišćen je regresioni polinom četvrtog stepena, a uticaj režima starenja je praćen kroz promene zatezne čvrstoće i kontrakcije starene legure. Na osnovu analize dobijenih rezultata utvrđeno je da se metod simpleks rešetke može uspešno primeniti kod izbora optimalnog režima onih vidova termičke obrade, gde se pri povećanju temperature, mora skraćivati vreme trajanja procesa i obrnuto (starenje, žarenje, homogenizacija i sl.).

**Ključne reči:** modeliranje; simpleks rešetke; eksperimentalni plan; proces starenja; Al legure.

Dostupno na Internetu sa adresu časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Pri homogenizaciji, žarenju, starenju i drugim oblicima termičke obrade legura mogu se izdvojiti operacije kod kojih su temperatura i vreme faktori koji utiču na osobine legure. Pri izboru optimalnih režima termičke obrade moguća rešenja su ograničena. Ova ograničenja u vezi su sa zakonitostima difuzionih procesa koji se odvijaju u legurama pri zagrevanju i kao posledica dovode do toga da se pri visokim temperaturama ovi procesi završavaju za relativno kratko vreme, dok se pri niskim temperaturama odvijaju sporo i za njihovo potpuno obavljanje potrebno je duže vreme. Variranje vremena trajanja procesa na visokim temperaturama, pri čemu ne dolazi do bitnih promena osobina legura, moguće je samo u dosta uskim granicama, dok je na nižim temperaturama ono moguće u znatno širem opsegu. Kao ilustracija ovog efekta može se navesti primer veštačkog starenja različitih hladno deformisanih Al-legura koje se, u principu, može vršiti u temperaturnom intervalu 200–230 °C u toku nekoliko časova, dok je na temperaturama iz opsega 100–120 °C potrebno nekoliko desetina ili stotina časova.

Cilj ovog rada bio je odrediti optimalni režim starenja komercijalne Al-legure iz familije durala, dobijene u industrijskim uslovima, ispitivanjem zavisnosti mehaničkih osobina od temperature i vremena starenja. Izbor optimalnog režima starenja legura veoma je važan jer će obezbediti uslove za optimalnu i kvalitetnu termičku obradu kojom se postiže otvrđnjavanje legure. Efekti otvrđnjavanja prilikom veštačkog starenja su kod

NAUČNI RAD

UDK 669.715.018

Hem. Ind. 66 (4) 601–607 (2012)

doi: 10.2298/HEMIND111203012I

legura iz familije durala od velike tehničke važnosti, jer se primenljivost ovih legura u konstrukcione svrhe zasniva na termomehaničkoj obradi u okviru koje je uključeno i starenje. Pod uticajem strukturalnih promena pri taloženju, postiže se odgovarajući stepen otvrđnjavanja koji podrazumeva promenu mehaničkih osobina od kojih je najznačajnije povećanje karakteristika čvrstoće. Uz to, procesom starenja dobija se proizvod sa stabilnom strukturom u kojoj se u toku eksploatacije neće odvijati unutrašnji strukturalni procesi. Ukoliko se pri veštačkom starenju prekorače optimalni uslovi, karakteristike čvrstoće i plastičnosti opadaju, pa je legura prestarela [1]. U radu je za izbor optimalnog režima starenja AlCu5PbBi legure primenjena metoda simpleks rešetke. Analizom literature koja se bavi ovom problematikom može se zapaziti da su u sličnim slučajevima, specijalni planovi nazvani simpleks-planovi, dobro razrađeni i obično se primenjuju u nauci o metalima pri proučavanju osobina legura u zavisnosti od sastava i pri optimizaciji sastava višekomponentnih smeša [2–10], kao i pri određivanju važnih karakteristika dijagrama ravnotežnih stanja [6,11,12].

## TEORIJSKE POSTAVKE

Metod simpleks-planova omogućava dobijanje složenih modela istraživanih zavisnosti [7–10]. Ovo je naročito važno, jer su linearni ili kvadratni modeli retko kad adekvatni pri variranju temperature i vremena u širokim granicama, a primena faktornih planova u cilju dobijanja modela trećeg ili viših stepena zahteva suviše veliki broj eksperimenata [5,6,13–19].

Pojam simpleksa biće ovde objašnjen na slučaju sa dva faktora, temperatura i vreme starenja, pri čemu se faktorni prostor svodi na ravan. U eksperimentima sa

Prepiska: S. Ivanov, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Srbija.

E-pošta: sivanov@tf.bor.ac.rs

Rad primljen: 3. decembar, 2011

Rad prihvaćen: 27. februar, 2012

dva faktora (u dvodimenzionalnom faktornom prostoru) eksperimentalne tačke su raspoređene u vrhovima i središtu trougla (tabela 1 i slika 1). Trougao koji sadrži eksperimentalne tačke je simpleksna rešetka koja predstavlja sve moguće kombinacije nivoa faktora. Ona se može označiti sa  $\{q,n\}$ , gde je  $q$  broj komponenti, a  $n$  stepen polinoma. U simpleksnoj rešetki  $\{q,n\}$  svaki faktor dobija  $n+1$  nivo, polazeći od nule pa do jedan:

$$(0, 1/n, 2/n, \dots, 1)$$

U potpunom planu eksperimenta moraju se ostvariti sve kombinacije nivoa faktora. Koliki će biti broj kombinacija nivoa faktora,  $k$ , zavisi od broja faktora  $q$  i stepena regresionog polinoma  $n$ , i definiše se izrazom (1):

$$k = \frac{(q+n-1)!}{n!(q-1)!} \quad (1)$$

U tabeli 1 dano je nekoliko najčešće korišćenih simpleks rešetki i šema planova eksperimentata po Scheffevom pristupu [2–4,20].

Korišćenje simpleks-planova svodi rešenje zadatka izbora optimalnog režima termičke obrade (starenja) na sledeće:

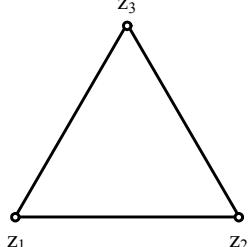
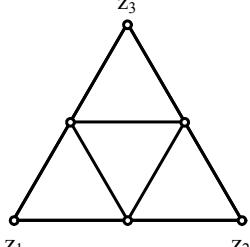
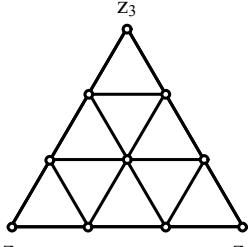
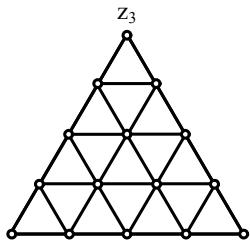
1. izbor oblasti ispitivanja, u slučaju kada je zadat interval variranja za temperaturu i vreme; izabrana oblast dobija oblik simpleksa, čiji se vrhovi označavaju sa  $z_i$  ( $\sum_{i=1}^3 z_i = 1$ );

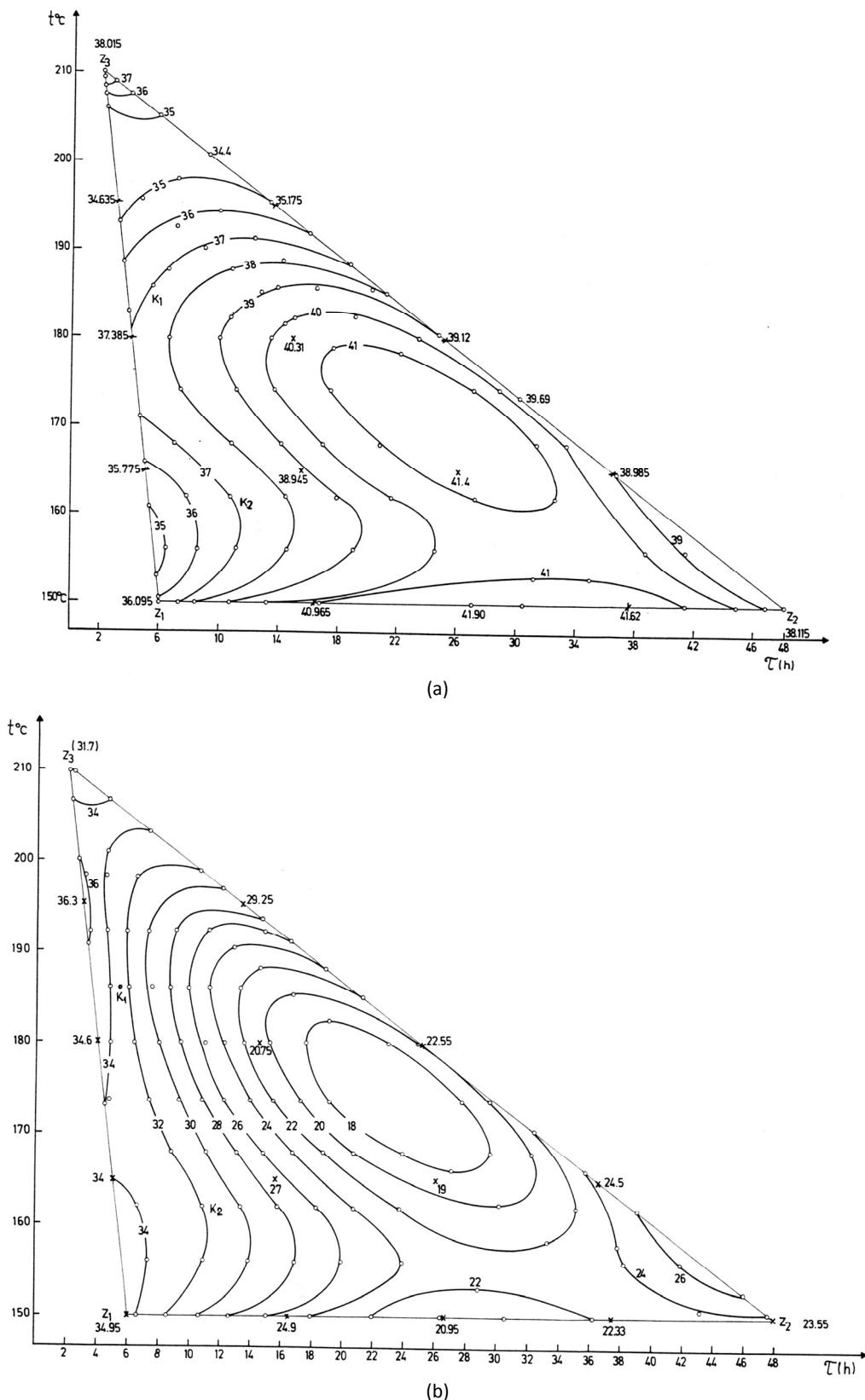
2. izbor plana eksperimenta i izvođenje eksperimentata prema planu (Tabela 1);

3. ocenjivanje koeficijenata modela  $y_i = f(z_1, z_2, z_3)$ , gde su  $y_i$  ispitivane osobine legure, a  $z_1, z_2$ , i  $z_3$  – promenljive u simpleks planu (ulazni faktori);

Tabela 1. Simpleks rešetke i šeme planova eksperimentata po Scheffe-u

Table 1. Simplex lattices and experimental Scheffer's plan

Stepen plana	Šema rasporeda eksperimentalnih tačaka	Naziv i opšti oblik modela
Prvi		Linerani model: $y = \sum_{1 \leq i \leq 3} \beta_i z_i$
Drugi		Kvadratni model: $y = \sum_{1 \leq i \leq 3} \beta_i z_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 3} \beta_{ij} z_i z_j$
Treći		Kubni model: $y = \sum_{1 \leq i \leq 3} \beta_i z_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 3} \beta_{ij} z_i z_j + \sum_{1 \leq i \leq j \leq 3} \gamma_{ij} z_i z_j (z_i - z_j) + \beta_{123} z_1 z_2 z_3$
Četvrti		Model četvrtog stepena: $y = \sum_{1 \leq i \leq 3} \beta_i z_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 3} \beta_{ij} z_i z_j + \sum_{1 \leq i \leq j \leq 3} \gamma_{ij} z_i z_j (z_i - z_j) + \sum_{1 \leq i \leq j \leq 3} \delta_{ij} z_i z_j (z_i - z_j)^2 + \beta_{1123} z_1^2 z_2 z_3 + \beta_{1223} z_1 z_2^2 z_3 + \beta_{1233} z_1 z_2 z_3^2$



Slika 1. Zavisnost mehaničkih osobina starene legure AlCu5PbBi od vremena i temperature (x – eksperimentalna tačka; o – računska tačka; K – kontrolna tačka): a) simpleks trougao promene zatezne čvrstoće ( $R_{\perp}$ ); b) simpleks trougao promene kontrakcije (Z).

Figure 1. Dependence of mechanical properties of AlCu5PbBi aged alloy on time and temperature (x—experimental point; o—calculating point; k—controlling point): a) Simplex triangle of changing tensile strength ( $R_m$ ); b) Simplex triangle changing the contraction ( $Z$ ).

4. proverava se adekvatnost modela;

5. ako je utvrđena adekvatnost modela, konstruišu se linije istoga nivoa u trouglu  $z_1, z_2, z_3$  i prenose te linije na oblast ispitivanja u koordinatama temperatura-vreme;

6. analiziraju se zakonitosti promene osobina koje proističu iz linija istoga nivoa i biraju se optimalni režimi koji omogućavaju da se obezbedi potreban nivo i tražene osobine legure.

Tabela 1 daje šeme planova eksperimenata u obliku Scheffe-ovog simpleks plana [2–4,20].

Ako se planu drugog reda doda centralna tačka dobija se nepotpuni model trećeg stepena:

$$y = \sum_{i=1}^3 \beta_i z_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ij} z_i z_j + \beta_{123} z_1 z_2 z_3 \quad (2)$$

Ako se planu drugog reda dodaju tri centralne tačke dobije se nepotpuni model četvrtog stepena:

$$\begin{aligned} y = & \sum_{i=1}^3 \beta_i z_i + \sum_{i,j=1}^3 \beta_{ij} z_i z_j + \beta_{1123} z_1^2 z_2 z_3 + \beta_{1223} z_1 z_2^2 z_3 + \\ & + \beta_{1233} z_1 z_2 z_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Među pomenutim modelima, po pravilu može se odabrati adekvatni model za standardne mehaničke osobine ( $R_m, R_{p0.2}, Z, \rho$  i dr.). Obično su najprostiji modeli (drugog reda) adekvatni za  $R_{p0.2}$  i  $\rho$ , a složeniji (četvrtog stepena) za  $R_m$  i  $Z$ .

Koefficijenti regresije u jednačinama modela određuju se na osnovu eksperimentalnih rezultata iz opštih jednačina za proračun i ocenu koefficijenata modela, a koji su detaljnije objašnjeni u literaturi [2–4].

Vrednosti  $y_i$  dobijene u eksperimentu, ali koje nisu korišćene pri izračunavanju koefficijenata modela, mogu se koristiti za proveru adekvatnosti modela. U slučajevima kada su sve tačke plana iskorišćene za proračun koefficijenata, proveru adekvatnosti treba vršiti u dopunskim, kontrolnim tačkama.

Adekvatnost se procenjuje Studentovim  $t$ -kriterijumom:

$$t_k = \frac{D_k \sqrt{r}}{\sigma_y \sqrt{1+A_k}} \leq t_{kr \alpha/k, f} \quad (4)$$

gde je  $D_k$  – maksimalna razlika između izračunate i stvarne vrednosti svojstva u tačkama u kojima se proverava adekvatnost;  $r$  – broj ponavljanja opita u tačkama plana;  $\sigma_y$  – disperzija eksperimenta (srednja kvadratna geška opita);  $A_k$  – izvesna veličina koja zavisi od položaja kontrolne tačke u trouglu plana eksperimenta i određuje se obično za svaki plan posebno (za plan prvog, drugog, trećeg, četvrtog stepena [2–4]);  $\alpha$  – nivo verovatnoće (obično  $\alpha = 0.05$ );  $k$  – kontrolna tačka u kojoj se vrši provera adekvatnosti modela;  $f$  – broj stepena slobode za ocenu disperzije rezultata eksperimenta. Ako je  $t_k > t_{kr}$  prihvata se hipoteza o neadekvatnosti, pa je korišćeni model neadekvatan, i obrnuto.

U toku istraživanja se često srećemo sa problemima koji zahtevaju obiman eksperimentalni rad za određivanje funkcionalne ili korelaceione zavisnosti veličina od niza faktora, npr. zavisnost osobine legure od sadržaja komponenti, zavisnost osobina kaluparskog materijala od sadržaja veziva i vlage i sl. Zajedničko obeležje svih ovih slučajeva je da zbir udela svih komponenti u mešavini iznosi 1. Formalnim matematičkim jezikom rečeno, ako je sistem sastavljen od  $q$  komponenti čiji su udeli u mešavini  $x_1, x_2, \dots, x_q$ , onda je:

$$x_i \geq 0 \text{ za } i=1,2,\dots,q \text{ i } x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1 \quad (5)$$

a ispitivana veličina se tada može izraziti regresionim polinomom [5,6,13–19]. Koristeći se ovim uslovom, regresioni polinom se može uprostiti smanjenjem broja koefficijenata regresije tako da će biti potreban manji broj rezultata za njihovo određivanje. Pošto se ovde redovno radi sa više faktora (veći broj komponenti mešavine), s toga, vezano za probleme kada je termička obrada metala i legura u pitanju o kojima se u radu govori, racionalno je koristiti specijalne planove nazvane simpleks.

## EKSPERIMENTALNI DEO

Istraživani su optimalni uslovi pri procesu jednostenog starenja Al-legure. Za eksperimente u radu izabrana je legura iz familije durala – AlCu5PbBi. Legura je uzeta iz proizvodnog programa Industrije obojenih metala Niš (Srbija). Od navedene legure su izrađene standardne epruvete za određivanje mehaničkih osobina ispitivanjem na zatezanje. Epruvete su termički obrađene i zatim su određene mehaničke osobine: zatezna čvrstoća ( $R_m$ ), kontrakcija ( $Z$ ), relativno izduženje ( $A$ ) i tvrdota po Vickersu ( $HV$ ).

Termička obrada epruveta sastojala se u homogenizacionom žarenju na 520 °C u toku 6 h, kaljenju u vodi i starenju prema zadatim režimima. Jedan od parametara optimizacije je zatezna čvrstoća ( $R_m$ ), a drugi parametar se odnosi na plastičnost legure – njena kontrakcija ( $Z$ ). Faktori su bili temperatura starenja ( $t$ ) i vreme starenja ( $\tau$ ). Za svaku kombinaciju nivoa faktora obavljena su po dva ponovljena očitavanja u nasumičnom poretku. Za izbor optimalnih uslova starenja korišćen je plan eksperimenta četvrtog stepena.

Plan eksperimenta, režimi starenja i dobijene vrednosti mehaničkih osobina starenih uzoraka izabrane legure dati su u tabeli 2. Temperatura starenja varirana je u granicama 150–210 °C, a vreme od 2 h na 210 °C i od 6–48 h na 150 °C. Mehaničke osobine legure menjaju se pod uticajem strukturnih promena pri taloženju.

## REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu rezultata ispitivanja legure u isporučenom stanju zaključuje se da je legura starena, ali primjenjeni režimi starenja nisu dali zadovoljavajuće rezul-

*Tabela 2. Plan eksperimenta, režimi starenja i rezultati eksperimenta*  
*Table 2. Experimental plan, aging regimes and experimental results*

Matrica plana				Režim starenja		Srednje vrednosti mehaničkih osobina			Rezultati eksperimenta
$z_1$	$z_2$	$z_3$	$t / ^\circ C$	$\tau / h$	$R_m / daN mm^{-2}$	$Z / %$	$A_{10} / %$	HV	$Y$
—	—	—	—	—	29.745	45.15	20.75	766	$Y_o = Z_o$
1	0	0	150	6	36.095	34.95	23.35	1071	$Y_1 = Z_1$
0	1	0	150	48	38.115	23.55	16.8	1235	$Y_2 = Z_2$
0	0	1	210	2	38.015	31.7	16.85	1130	$Y_3 = Z_3$
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	0	150	16.5	40.965	24.9	19.275	1245	$Y_{1112} = Z_{1112}$
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	150	27	41.90	20.95	17.6	1260	$Y_{1122} = Z_{1122}$
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	0	150	37.5	41.62	22.35	16	1290	$Y_{1222} = Z_{1222}$
0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	165	36.5	38.985	24.5	14.8	1265	$Y_{2223} = Z_{2223}$
0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	180	25	39.12	20.55	11.87	1220	$Y_{2233} = Z_{2233}$
0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	195	13.5	35.175	29.25	13.15	1070	$Y_{2333} = Z_{2333}$
$\frac{1}{4}$	0	$\frac{1}{4}$	195	3	34.635	36.3	13.65	1020	$Y_{3331} = Z_{3331}$
$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	180	4	37.385	34.6	16.75	1220	$Y_{3311} = Z_{3311}$
$\frac{1}{4}$	0	$\frac{1}{4}$	165	5	35.775	34.0	20.3	1060	$Y_{3111} = Z_{3111}$
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	165	15.5	38.945	27.0	18.2	1250	$Y_{1123} = Z_{1123}$
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	165	26	41.40	19.0	16.4	1340	$Y_{1223} = Z_{1223}$
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	180	14.5	40.31	20.75	15.75	1200	$Y_{1233} = Z_{1233}$

tate. Smatramo da dobijene vrednosti mehaničkih osobina nisu optimalne, iz razloga što je korišćena legura direktno iz proizvodnog programa Industrije obojenih metala Niš (Srbija), čiji hemijski sastav nije prethodno određivan, a u toku kontrolnih ispitivanja je utvrđena nehomogenost legure.

Sa dobijenim rezultatima izrađena su tri različita modela za  $R_m$  i  $Z$  (prema planu drugog reda, nepotpunom planu četvrtog reda i planu četvrtog reda). Regresiona analiza je pokazala da su model drugog reda i nepotpuni model četvrtog reda neadekvatni. Zbog toga je plan eksperimenta proširen dodavanjem novih tačaka do simpleks plana četvrtog reda čija je matrica plana sa regresionim polinomom data u tabeli 1.

Za proveru adekvatnosti izabranih modela korišćene su kontrolne tačke plana  $K_1$  ( $z_1 = 0.36$ ,  $z_2 = 0.04$ ,  $z_3 = 0.6$ ) i  $K_2$  ( $z_1 = 0.67$ ,  $z_2 = 0.13$ ,  $z_3 = 0.2$ ) i izvršena su dopunska ispitivanja starenjem pri  $186 ^\circ C$  i  $5.5$  h i pri  $162 ^\circ C$  i  $10.5$  h.

Analiza je pokazala adekvatnost modela četvrtog stepena za  $R_m$  i  $Z$  po Studentovom  $t$ -kriterijumu za koeficijent verodostojnosti  $\alpha = 0.05$  i 16 stepeni slobode u kontrolnim tačkama  $K_1$  i  $K_2$ , za praćene mehaničke osobine.

Rezultati matematičke obrade potvrđuju da postoji stroga zavisnost mehaničkih osobina – zatezne čvrstoće i kontrakcije legure od temperature i vremena starenja, definisana regresionim polinomom četvrtog stepena, prema jednačinama (6) i (7).

Regresioni polinom za zateznu čvrstoću glasi:

$$\hat{y}_{R_m} = z_1(36.095 + 19.1z_2) + z_2(38.155 + 4.14z_3) + \\ + z_3(38.015 + 1.32z_1) + \\ + z_1z_2(z_1 - z_2)[2 + 12.507(z_1 - z_2)] + \\ + z_2z_3(z_2 - z_3)[19.95 - 38(z_2 - z_3)] + \\ + z_1z_3(z_1 - z_3)[11.2 - 44.747(z_1 - z_3)] + \\ + z_1z_2z_3(259.9z_3 - 200.96z_1 - 0.933z_2) \quad (6)$$

Regresioni polinom za kontrakciju glasi:

$$\hat{y}_Z = z_1(34.95 - 33.2z_2) + z_2(23.55 - 28.3z_3) + \\ + z_3(31.7 + 5.1z_1) + \\ + z_1z_2(z_1 - z_2)[12.8(z_1 - z_2) - 16.8] + \\ + z_2z_3(z_2 - z_3)[97.2(z_2 - z_3) - 3.6] + \\ + z_1z_3(z_1 - z_3)[18.5(z_1 - z_3) - 20.9] + \\ + z_1z_2z_3(497.47z_1 - 176.9z_2 - 571.2z_3) \quad (7)$$

Korišćenjem ovih modela i eksplicitnog kompjuterskog programa [7], konstruisani su dijagrami izo-linija nivoa  $y_{Rm} = f(z_1, z_2, z_3)$  i  $y_Z = f(z_1, z_2, z_3)$ . Izo-linije predstavljaju skup tačaka temperature i vremena koje daju iste vrednosti zatezne čvrstoće i kontrakcije. U koordinatama temperatura-vreme sistemi linija istoga nivoa odražavaju zakonitost promene mehaničkih osobina ispitivane legure u zavisnosti od režima starenja, slika 1. Konstruisani dijagrami pomoću dobijenih regresionih polinoma (6) i (7), potvrđuju adekvatnost aproksimacije.

Pojedine mehaničke osobine legure različito se menjaju pod uticajem strukturalnih promena pri taloženju [1]. Na osnovu ovakvog grafičkog prikaza mogu se jednostavno odrediti režimi starenja koji će za AlCu5PbBi leguru, obezbediti zahtevane mehaničke osobine. Temperature koje mogu biti korišćene u termičkoj obradi komercijalnih legura su određene i ekonomskim aspektima, tj. dobiti željene osobine unutar razumnog perioda vremena. Međutim, kako se na jednoj temperaturi, ali za različita vremena, mogu dobiti iste mehaničke osobine, onda treba uvek birati kraća vremena jer ona obezbeđuju stabilnije osobine. Ovo se čini i zbog toga, što pri dužim vremenima počinje prestarevanje. Dalje, treba radije birati više temperature i kraće vreme starenja, jer se i tu dobiju stabilniji talozi.

Analiza prikazanih rezultata odredila je mogućnost da se izvrši starenje AlCu5PbBi legure pri 180 °C i 10–14 h što osigurava maksimalnu zateznu čvrstoću ( $R_m$ , 39–40 daN/mm<sup>2</sup>) pri zadovoljavajućoj plastičnosti ( $Z = 24\%$ ), kao i pri 200 °C i 6–8 h, što osigurava najbolju plastičnost ( $Z, 34$ –36 %) uz zadovoljavajuću čvrstoću ( $R_m = 35$  daN/mm<sup>2</sup>) legure.

Prednost ovog tipa modeliranja je taj što se do dijagrama promene mehaničkih osobina starene AlCu5PbBi legure dolazi sa svega 15 eksperimentalnih jedinica. Sa aspekta pimjenjivosti to znači velike uštede vremena i materijala.

Dalja istraživanja u oblasti modeliranja procesa starenja legura, treba da budu usmerena na primenu metoda multilinearne regresije i veštačkih neuronskih mreža [21–25], što bi rezultiralo predviđanjem izlaznih vrednosti na osnovu poznatih ulaznih parametara i statističke povezanosti među njima. Ove metode predstavljaju korisne alatke za grupisanje, analizu i utvrđivanje korelacionih veza između parametara radi rešavanja problema u tehnološkim procesima.

## ZAKLJUČAK

U ovom radu je pokazano da je termičkim taloženjem prilikom veštačkog starenja postignut visok stepen otvrđnjavanja AlCu5PbBi legure i s tim u vezi promene mehaničkih osobina, kroz značajno povećanje karakteristika čvrstoće ( $R_m, 40$ –42 daN/mm<sup>2</sup>, 1200–1340 HV) usled strukturalnih promena procesima izdvajanja i taloženja.

Takođe, u ovom radu je uspešno primenjena statistička metoda za optimizaciju osnovnih procesnih parametara, temperatura i vreme starenja. Pokazano je da se sa relativno malim brojem eksperimenata može dobiti pouzdan model koji opisuje uticaj ovih parametara na proces otvrđnjavanja taloženjem pri starenju Al-legure iz familije durala. Rezultati, dobijeni modeliranjem, pokazuju da je zavisnost mehaničkih osobina Al-legure od temperature i vremena starenja određena regresionim polinomom četvrtog stepena.

Ustanovljeno je da su optimalni uslovi pri starenju: temperatura taloženja 180 °C i vreme 10–14 h kada je postignuta maksimalna čvrstoća ( $R_m, 39$ –40 daN/mm<sup>2</sup>) pri zadovoljavajućoj plastičnosti ( $Z = 24\%$ ), kao i temperatura taloženja 200 °C i vreme 6–8 h kada je najbolja plastičnost ( $Z, 34$ –36 %) uz zadovoljavajuću čvrstoću ( $R_m = 35$  daN/mm<sup>2</sup>) legure.

## Zahvalnica

Istraživanja su finansirana od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije (Projekat TR34003).

## LITERATURA

- [1] D. Altenpohl, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Springer-Verlag, Berlin, 1965.
- [2] Ž.R. Lazić, Design of Experiments in Chemical Engineering: A Practical Guide, Wiley–VCH, Weinheim, 2004, p. 465.
- [3] I.G. Zedginidze, Mathematical planed of experiment for the examination and optimization of mixture characteristics, Mecniereba, Tbilisi, 1971, pp. 34–110.
- [4] F.S. Novik, Mathematical methods of planning experiments in metal science, Section 4, Moscow, Moscow Institute of Steel and Alloys, 1971, pp. 3–133.
- [5] K. Hinkelmann, O. Kempthorne, Design and Analysis of Experiments: Advanced experiment design, Vol. 2, John Wiley and Sons, New York, 2005, p. 279.
- [6] I. Pantelić, Uvod u teoriju inžinjerskog eksperimenta, Univerzitet „Radivoj Čirpanović“, Novi Sad, 1976.
- [7] E.D. Požega, S.Lj. Ivanov, Ć. Abazi, Kompjuterski program za polinom četvrtog stepena, Inovacije i razvoj (2) (2008) 51–62.
- [8] S. Ivanov, E. Požega, Influence of the Composition of the Boronizing Mixture on the Dimension Change of Pressed and Boronized Samples from Iron Powder, Sci. Sinter. **40** (2008) 197–205.
- [9] E. Požega, S. Ivanov, Uticaj sadržaja aktivatora u smeši za boriranje na poroznost presovanih i boriranih uzorka od železnog praha, Hem. ind. **62** (2008) 164–169.
- [10] E. Požega, S. Ivanov, V. Conić, B. Čađenović, Mogućnost procesa boriranja na presovanim uzorcima od železnog praha, Hem. ind. **63** (2009) 253–258.
- [11] A.M. Mitovski, D.T. Živković, D.M. Manasijević, D.M. Minić, Lj.T. Balanović, N.D. Štrbac, Termodinamička analiza i ispitivanje faznih ravnoteža u Pb–Zn–Ag sistemu, Hem. ind. **64** (2010) 99–103.
- [12] D. Živković, D. Minić, D. Manasijević, J. Šestak, Ž. Živković, Thermal analysis and prediction of phase equilibria in ternary Pb–Zn–Ag system, J. Min. Metall., B **47** (2011) 23–30.
- [13] S. Chatterje, B. Price, Regression Analysis by Example, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1991.
- [14] G.I. Krasovskiy, G.F. Filaretov, Planirovanie eksperimenta, Nauka i tehnika, Minsk, 1982.
- [15] B. Barisic, B. Grizelj, M. Plancak, Modeling Approach for Determining of Backward Extrusion Strain Energy on AlCu5PbBi, Key. Eng. Mater. **367** (2008) 221–230.

- [16] B. Barišić, Z. Car, M. Ikonović, Analysis of Different Modeling Approach at Determining of Backward Extrusion Force on AlCu5PbBi Material, *Metallurgy* **47** (2008) 313–316.
- [17] S. Ivanov, B. Stanojević, The Influence of Density of Pressed Iron Powder Samples on the Quality of Boride Layers, *Sci. Sinter.* **35** (2003) 93–98.
- [18] S. Ivanov, Struktura i svojstva okruglih i profilisanih bakarnih proizvoda u zavisnosti od termomehaničkih parametara prerade, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, 1998.
- [19] S. Ivanov, B. Kočovski, B. Stanojević, Ocena uticaja termomehaničkih parametara prerade bakarne žice na izduženje spirale primenom faktornog eksperimenta, *Metalurgija – MJoM* **2** (1996) 13–23.
- [20] H. Scheffe, Simplex-centroid designs for experiments with mixtures, *J. Roy. Stat. Soc. B* **25** (1963) 235–263.
- [21] Ž. Živković, N. Mitevska, I. Mihajlović, Dj. Nikolić, The influence of the silicate slag composition on copper losses during smelting of the sulfide concentrates, *J. Min. Metall., B* **45** (2009) 23–34.
- [22] Ž. Živković, I. Mihajlović, Đ. Nikolić, Artificial neural network method applied on the nonlinear multivariate problems, *Serb. J. Manage.* **4** (2009) 143–155.
- [23] I. Djurić, P. Djordjević, I. Mihajlović, Dj. Nikolić, Ž. Živković, Prediction of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  leaching recovery in the Bayer process using statistical multilinear regression analysis, *J. Min. Metall., B* **46** (2010) 161–169.
- [24] P. Đorđević, I. Mihajlović, Ž. Živković, Comparison of linear and nonlinear statistics methods applied in industrial process modeling procedure, *Serb. J. Manage.* **5** (2010) 189–198.
- [25] Ž. Živković, I. Mihajlović, I. Djurić, N. Šrbac, Statistical Modeling of the Industrial Sodium Aluminate Solutions Decomposition Process, *Metall. Mater. Trans., B* **41** (2010) 1116–1122.

## SUMMARY

### OPTIMIZATION OF THE AGING REGIME OF AI-BASED ALLOYS

Svetlana Lj. Ivanov, Ljubica S. Ivanić, Dragoslav M. Gusković, Srba A. Mladenović

*University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, Bor, Serbia*

(Scientific paper)

Successful simulation of problems and phenomena related to the changes of the alloys composition is possible by applying simplex plans. The concentration (simplex) triangle application for the design of the optimal regime of Al–5wt%Cu–Pb–Bi alloy aging process is presented in this paper. The iso-lines of the given alloy's mechanical properties in temperature–aging time coordinates were obtained by applying the mathematical models based on the given aging regimes, and the obtained results of changed properties. Regression polynomial of the fourth degree was used as the mathematical model, whereas the effect of the aging regime has been observed through the changes of tensile strength and contraction. Based on the obtained results, we have come to the conclusion that the simplex lattice method can be successfully applied to a great number of heat treatment aspects when with the increase of the temperature the duration time must be reduced, and vice versa (aging, annealing, homogenizing, etc.).

**Keywords:** Modelling • Simplex lattices • Experimental plan • Aging process • Al alloys