

Marko S. Sudić

**OPTIMIZACIJA ELEKTROLITIČKOG TALOŽENJA LEGURE  
OLOVO—KALAJ 10 — BAKAR 3, NA PONIKLOVANU OSNOVU  
OLOVNE BRONZE, ZA POSTIZANJE NAJBOLJE ATHEZIJE  
IZMEĐU PREVLAKE I OSNOVE**

THE OPTIMIZATION OF ELECTROCHEMICAL DEPOSITION LEAD-TIN  
10 COPPER 3 ALLOY ON NICKEL-PLATING BASE OF LEAD BRONZE,  
FROM THE ASPECT OF REACHING THE BEST ADHEZION BETWEEN  
THE COATING AND BASE

**Izvod**

Tema rada je optimiziranje elektrolitičkog taloženja legure olovo-kalaj-bakar na poniklovanu olovnu bronzu kod kliznih ležaja sa ciljem postizanja najbolje athezije prevlake prema osnovi.

Za kvantitativno mjerenje athezije prevlake prema osnovi primijenjen je postupak određivanja napona smicanja unutar sloja prevlake

**Synopsis**

The theme of the paper presents optimization of electrochemical deposition alloy lead-tin-copper on nickel-plating base of lead bronze on the sliding bearing in order to achieve the best adhesion of coating to the base.

For the quantitative measurement of coating to the base it was utilized a method of determining shear strength within coating layers.

**Uvod**

Athezija legure olovo-kalaj-bakar, koja se upotrebljava kao završni klizni sloj kod kliznih ležišta namijenjenih motorima sa unutrašnjim, sagonijevanjima, zavisi: od pripreme površine za elek-

trolitičko taloženje legure, od prirode površine po kojoj se vrši elektrolitičko taloženje legure, od hemijskog sastava elektrolita iz koga se elektrolitički taloži legura i, na kraju, od uslova elektrolitičkog taloženja legure.

U uslovima velikoserijske proizvodnje kliznih ležišta veoma je bitno da kvalitet athezije prevlake legure za ležišnu osnovu bude, pored ostalih parametara kvaliteta, uvijek dobar i standardan.

Cilj je ovog rada da se formira linearni matematički model na osnovu koga će biti moguće odrediti sastav elektrolita i uslove elektrolitičkog taloženja legure olovo-kalaj-bakar iz borfluoridnih rastvora, pri kojima će se taložiti legura sa najboljom athezijom prema osnovi, uz ostale parametre kvaliteta, čime se u praksi postiže velika ekonomičnost.

#### EKSPERIMENTALNI DIO

Elektrolitičko taloženje legure olovo-kalaj-bakar izvođeno je na bimetalnim pločicama od čelične osnove i nalivene legure olovne bronzne, dimenzije 120×50 mm.

Površine olovne bronzne bimetalnih pločica prethodno su brušene.

Poslije brušenja bimetalne pločice su prane i odmašćivane u etrahloretilenu na automatskom uređaju Karl Roll (S. R. Njemačka).

Čelične površine odmašćenih bimetalnih pločica parafinisane su radi sprečavanja elektrolitičkog taloženja prevlaka po njima.

Nakon parafinisanja izvođeno je anodno nagrivanje površina olovne bronzne u rastvoru hlorovodonične kiseline koncentracije 24—26% u trajanju 3 min. 20 sek. na sobnoj temperaturi sa gustinom anodne struje od 2,8 A dm<sup>-2</sup>. U svojstvu katode, pri anodnom nagrivanju, upotrebljavana je grafiitna pločica dimenzija 150×88 mm, proizvod Tvornice grafiitnih elektroda u Dubrovniku.

Nagrivene pločice ispirane su prvo vodovodskom, a potom demineralizovanom vodom.

Po ispiranju izvršeno je dekapiranje bimetalnih pločica u rastvoru hlorovodonične kiseline, koncentracije 24—26%, pa je ponovljeno ispiranje vodovodskom i demineralizovanom vodom. Na tako pripremljene površine bimetalnih pločica taložen je sloj mat nikla, 1—2 μm, iz rastvora za niklovanje:

Ni <sup>2+</sup>	74,7 gl <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	14,5 gl <sup>-1</sup>
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	30,8 gl <sup>-1</sup>
pH	4—5

Katodna gustina struje pri taloženju prevlake nikla po površini olovne bronzne iznosila je 2,0 A dm<sup>-2</sup>, temperatura rastvora 40—44°C, a trajanja elektrolitičkog taloženja prevlake nikla 4 min,

20 sek. Kao anoda u procesu taloženja prevlake nikla korišćena je pločica od nikla (99,99%) dimenzija  $100 \times 55 \times 8$  mm. Poniklovane bimetalne pločice ispirane su prvo vodovodskom pa demineralizovanom vodom.

Na poniklovane površine olovne bronzne bimetalnih pločica taložene su prevlake legure olovo-kalaj-bakar iz borfluoridnog rastvora, sastava:

$Pb^{2+}$	105,0 $gl^{-1}$
$HBF_4$	40,0 $gl^{-1}$
$Sn^{4+}$	7,5 $gl^{-1}$
$H_3BO_3$	10,0 $gl^{-1}$
rezorcin	5,0 $gl^{-1}$
antarox	0,008 $gl^{-1}$
$Sn^{2+}$ —	promjenljiva koncentracija
$Cu^{2+}$ —	promjenljiva koncentracija
želatin —	promjenljiva koncentracija

Prevlačka legure olovo-kalaj-bakar taložena je pri temperaturi  $20-22^\circ C$  u vremenu 63 min. 30 sek., sa katodnom gustinom struje koja je bila takođe nezavisno promjenljiva veličina.

Anode za elektrolitičko taloženje legure olovo-kalaj-bakar izlivenne su od olova (čistoće 99,99%, Trepča) i kalaja (čistoće 99,9%, uvoz iz Malezije) u obliku pločica dimenzija  $100 \times 52 \times 3$  mm sa hemijskim sastavom 86,2% Pb i 13,8% Sn.

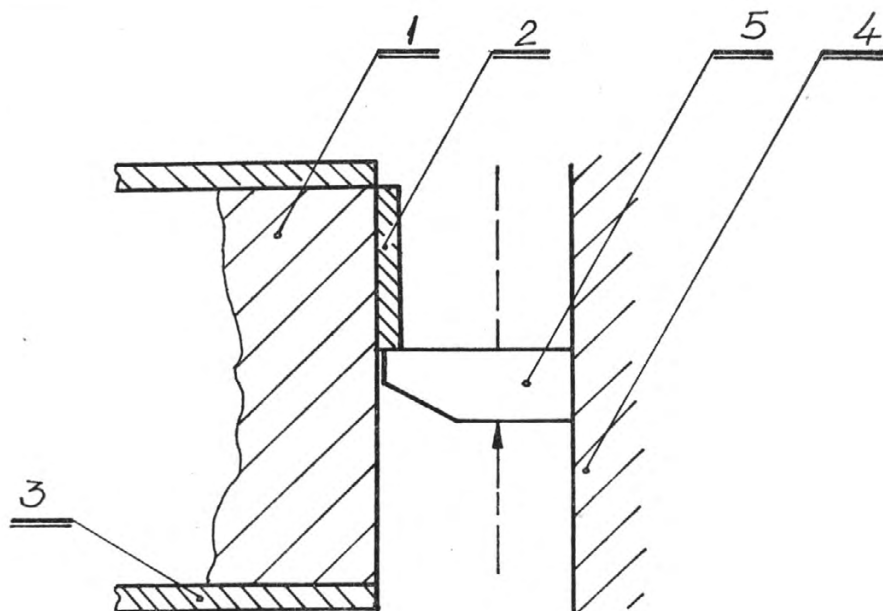
Tokom elektrolitičkog taloženja prevlake legure olovo-kalaj-bakar, anode od legure olovo-kalaj nalazile su se u vrećicama od pamučnog gustog tkanja.

Bimetalne pločice poslije elektrolitičkog taloženja legure olovo-kalaj-bakar prvo su ispirane u vodovodskoj a potom u demineralizovanoj vodi, pa onda vrućoj demineralizovanoj vodi i, na kraju, sušene u struji toplog vazduha, da bi se poslije svega podvrgle kvantitativnom mjerenju athezije između prevlake legure olovo-kalaj-bakar i osnove od poniklovane olovne bronzne.

Anodno nagnizanje, dekapiranje, taloženje prevlake mat nikla i taloženje legure olovo-kalaj-bakar na bimetalnim pločicama izvođena su u kadicama od tvrdog polipropilena dimenzija  $148 \times 65 \times 40$  mm.

Za pripremanje rastvora za nagnizanje i taloženje galvanskih prevlaka metala po bimetalnim pločicama korišćene su tehničke hemikalije, koje Industrija ležaja u Kotoru dobavlja od svojih domaćih i inostranih isporučilaca.

Kvantitativno mjerenje athezije prevlake legure olovo-kalaj-bakar za osnovu od poniklovane olovne bronzne izvedeno je u postupku određivanja sile smicanja (napona smicanja) unutar prevlake legure, na specijalno konstruisanom alatu (čiji je šematski prikaz dat na sl. 1.) koji se jednostavno priključuje na univerzalnu kladalicu.



Sl. 1. Šema uređaja za mjerenje athezije prevlake od legure olovo-kalaj-bakar za osnovu od olovne bronce. 1 — osnova uzorka, 2 — prevlaka, 3 — prihvatlač za uzorak, 4 — klizno vodište i 5 — nož za smicanje

Fig. 1. Scheme of equipment utilized to measure adhesion of coating of alloy lead-tin-copper for the base of lead bronze. 1 — a base of sample, 2 — coating, 3 — sample holder, 4 — sliding trackway, 5 — shearing knife

#### USLOVI IZVOĐENJA EKSPERIMENTA

Za optimizaciju elektrolitičkog taloženja legure olovo-kalaj-bakar iznad nikal-barijere po površini olovne bronce primijenjen je puni faktorni eksperiment  $2^n$  (1, 2), gdje je »n« broj nezavisno promjenljivih veličina (ulazne veličine). Nezavisno promjenljive veličine u ogledima: početni sadržaj bakra, kalaja (II) i želatina u rastvoru za taloženje legure i gustina struje pri elektrolitičkom taloženju prevlake legure, označene su sa X uz odgovarajući arapski broj u indeksu (tabl. 1).

Tabl. 1 — Nivoi nezavisno promjenljivih veličina (faktori)

Levels of independent variable values (factors)

Faktori	X <sub>1</sub> Cu <sup>2+</sup> , gl <sup>-1</sup>	X <sub>2</sub> Sn <sup>2+</sup> , gl <sup>-1</sup>	X <sub>3</sub> želatini gl <sup>-1</sup>	X <sub>4</sub> gustina struje Adm <sup>-2</sup>
Osnovni nivo (X <sub>i0</sub> )	2,0	6,3	0,4	2,2
Hod variranja (X <sub>i</sub> )	1,0	1,8	0,1	1,0
Gornji nivo (X <sub>i</sub> )	3,0	8,1	0,5	3,2
Donji nivo (X <sub>i</sub> )	1,0	4,5	0,3	1,2

Prema jednačini (1):

$$x_i = \frac{X_i - X_{oi}}{\Delta X_i} \dots \dots \dots 1$$

kodirane veličine faktora  $x_i$  povezane su sa prirodnim veličinama  $x_i$  slijedećim izrazima:

$$x_1 = \frac{X_1 - 2,0}{1,0} = \pm 1$$

$$x_2 = \frac{X_2 - 6,3}{1,8} = \pm 1$$

$$x_3 = \frac{X_3 - 0,4}{0,1} = \pm 1$$

$$x_4 = \frac{X_4 - 2,2}{1,0} = \pm 1$$

Zavisno promjenljiva veličina, athezija prevlake za osnovu od poniklovane olovne bronzne, označena je u planu faktornog eksperimenta sa  $\bar{y}$  (tabl. 2).

Tabl. 2 — Plan 2<sup>4</sup> i athezija prevlake  $\bar{y}$  u (N mm<sup>-2</sup>)  
Plan 2<sup>4</sup> and adhesion of coating  $\bar{y}$  in (N mm<sup>-2</sup>)

Broj serije ogleda	Kodirane veličine				Prirodne veličine				$\bar{y}/\text{Nmm}^{-2}$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	
1	+	+	+	+	3,0	8,1	0,5	3,2	0,247
2	-	+	+	+	1,0	8,1	0,5	3,2	0,183
3	+	-	+	+	3,0	4,5	0,5	3,2	0,184
4	-	-	+	+	1,0	4,5	0,5	3,2	0,204
5	+	+	-	+	3,0	8,1	0,3	3,2	0,177
6	-	+	-	+	3,0	8,1	0,3	3,2	0,220
7	+	-	-	+	3,0	4,5	0,3	3,2	0,201
8	-	-	-	+	1,0	4,5	0,3	3,2	0,181
9	+	+	+	-	3,0	8,1	0,5	1,2	0,128
10	-	+	+	-	1,0	8,1	0,5	1,2	0,128
11	+	-	+	-	3,0	4,5	0,5	1,2	0,116
12	-	-	+	-	1,0	4,5	0,5	1,2	0,131
13	+	+	-	-	3,0	8,1	0,3	1,2	0,153
14	-	+	-	-	1,0	8,1	0,3	1,2	0,149
15	+	-	-	-	3,0	4,5	0,3	1,2	0,128
16	-	-	-	-	1,0	4,5	0,3	1,2	0,124

Za određivanje zavisno promjenljive veličine ( $\bar{y}$  athezije prevlake za osnovu) pri određenim vrijednostima nezavisno promjenljivih, paralelno su izvođena tri ogleda, pa stoga vrijednost zavisno

promjenljive veličine predstavlja srednju vrijednost od tri paralelna određivanja  $\bar{y}$ :

$$\bar{y} = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3}{3} \dots \dots \dots 2$$

Plan faktornog eksperimenta  $2^4$  sa kodiranim i prirodnim veličinama faktora za zavisno promjenljivu veličinu (atheziju prevlake za osnovu) dat je u tabl. 2.

Prema izabranom planu eksperimenta izvršena je randomizacija 16 ogleda, kako je prikazano u tabl. 3.

Tabl. 3 — Raširena matrica plana  $2^4$  i athezija prevlake  $\bar{y}$   
Spread matrix of plan  $2^4$  and adhesion of coating

Redoslijed ogleda	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_1X_4$	$X_2X_3$	$X_2X_4$	$X_3X_4$	$X_1X_2X_3$	$X_1X_2X_4$	$X_1X_3X_4$	$X_2X_3X_4$	$X_1X_2X_3X_4$	Adhezija $\bar{y}$ , Nmm <sup>-2</sup>
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,247
2	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	0,183
3	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	0,184
4	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	0,204
5	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	0,177
6	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	0,220
7	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	0,201
8	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	0,181
9	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	0,128
10	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	0,128
11	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	0,116
12	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	0,131
13	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	0,153
14	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	0,149
15	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	0,128
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	0,124

Tabl. 4. prikazuje vrijednosti zavisno promjenljive veličine (athezija prevlake za osnovu) sa vrijednostima faktora na osnovnom nivou.

Tabl. 4 — Vrijednost zavisno promjenljive veličine pri nultom ogledu  
Values of dependent variable values at zero test

Nezavisno promjenljive veličine				Zavisno promjenljiva
$X_1$ Cu <sup>2+</sup> , gl <sup>-1</sup>	$X_2$ Sn <sup>2+</sup> , gl <sup>-1</sup>	$X_3$ žel. gl <sup>-1</sup>	$X_4$ A dm <sup>-2</sup>	$\bar{y}$ adhezija u N mm <sup>-2</sup>
2,0	6,3	0,4	2,2	0,160

Disperzije ogleda izračunavane su prema jednačini (1, 2):

$$S^2_{y(u)} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^g (y_{uk} - \bar{y}_u)^2 \quad \dots \quad 3$$

gdje je:

- g — broj paralelnih ogleda (k=1, 2, ... g),  
 $y_{uk}$  — eksperimentalna vrijednost izlaznog parametra,  
 $\bar{y}_u$  — srednja vrijednost izlaznog parametra izračunata iz rezultata ogleda po jednačini:

$$\bar{y}_u = \frac{1}{g} \sum_{k=1}^g y_{uk} \quad \dots \quad 4$$

Vrijednosti disperzija serije ogleda date su u tabl. 5. (tabl. 5)

Provjera jednorodnosti disperzija ogleda izvršena je po kriterijumu Kohrena (1, 2), odnosno prema jednačini:

$$\text{Grač.} = \frac{S^2_{yu \max.}}{\sum_{u=1}^N S^2_{yu}} \quad \dots \quad 5$$

Tabl. 5 — Proračun disperzija ogleda athezije prevlake  
 Calculations of dispersions regarding adhesion of coating test

Broj ogl. u	Broj pon. g	Adhez. N mm <sup>-2</sup> y	$\bar{y}$	Sy <sup>2</sup> (u)	Broj ogl. u	Broj pon. g	Adhez. N mm <sup>-2</sup> y	$\bar{y}$	Sy <sup>2</sup> (u)
1	1	0,112			9	1	0,180		
	2	0,124	0,124	0,000144		2	0,204	0,181	0,000485
	3	0,136				3	0,160		
2	1	0,124			10	1	0,164		
	2	0,140	0,128	0,000112		2	0,196	0,183	0,000277
	3	0,120				3	0,188		
3	1	0,156			11	1	0,200		
	2	0,164	0,149	0,000357		2	0,248	0,220	0,000642
	3	0,128				3	0,212		
4	1	0,136			12	1	0,188		
	2	0,116	0,131	0,000165		2	0,188	0,204	0,000706
	3	0,140				3	0,234		
5	1	0,112			13	1	0,204		
	2	0,136	0,128	0,000192		2	0,200	0,201	0,000005
	3	0,136				3	0,200		
6	1	0,128			14	1	0,192		
	2	0,092	0,116	0,000432		2	0,176	0,184	0,000064
	3	0,128				3	0,184		
7	1	0,148			15	1	0,164		
	2	0,160	0,153	0,000037		2	0,176	0,177	0,000197
	3	0,152				3	0,192		
8	1	0,120			16	1	0,240		
	2	0,123	0,128	0,000048		2	0,260	0,247	0,000133
	3	0,132				3	0,240		

gdje je:

$S^2_{yu2 \max}$ . — maksimalna disperzija u izvedenim ogledima,

$\sum_{u=1}^N S_{yu}$  — suma svih disperzija u N (16) ogleda.

Vrijednosti  $G^{rač.}$  za određivanje zavisno promjenljive (athezije prevlake za osnovu) jeste:

$$G^{rač.} = 0,177.$$

Za stepen tačnosti  $q=0,05$ , broj stepena slobode  $f=g-1=3-1=2$  i broj ogleda  $N=16$ , tablična vrijednost  $G_{0,05; 2; 16}^{tabl. (2)}$  dobijena linearnom interpolacijom, iznosi 0,322. Pošto su uslovi izvođenja svih ogleda bili isti, vrijednost je  $G^{tabl.}$  stalna i prema njoj su proverene jednorodnosti disperzija ogleda.

Kako je ispunjen uslov prema relaciji:

$$G^{rač.} < G_{0,05; 2; 16}^{tabl.} = 0,322 \dots \dots \dots 6$$

red disperzija u svim ogledima smatra se jednorodnim.

Prema jednačini:

$$S^2_{yu} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_{yu}}{N} \dots \dots \dots 7$$

srednja disperzija pri određivanju athezije prevlake za osnovnu iznosi:

$$S^2_{yu} = 0,000249.$$

Broj stepena slobode  $f_1$  (2) koji se izračunava iz jednačine:

$$f_1 = N(g-1) \dots \dots \dots 8$$

iznosi pri određivanju zavisno promjenljive (athezije prevlake za osnovu):

$$f_1 = 16(3-1) = 32.$$

Koristeći razvijenu matricu prikazanu u tabl. 3. izračunavanje koeficijenata za jednačinu regresije (model):

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 4} b_{1i} x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 4} b_{1ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq 4} b_{1ijk} x_i x_j x_k + \sum b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 \dots \dots 9$$

izvedeno je prema izrazu (1):

$$b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{1u} \cdot \bar{y}_u}{N} \dots \dots \dots 10$$



gdje je:

$$i = 0, 1, 2, \dots, k$$

Koeficijenti jednačine 9 pri određivanju athezije prevlake za osnovu, određeni prema jednačini 10, imaju sljedeće vrijednosti:

$b_0 = 0,1658$	$b_1 = 0,0009$	$b_2 = 0,0072$
$b_3 = -0,0007$	$b_4 = 0,0337$	$b_{12} = 0,0022$
$b_{13} = 0,0027$	$b_{14} = 0,0017$	$b_{23} = -0,0009$
$b_{24} = -0,0001$	$b_{34} = 0,0056$	$b_{123} = 0,0101$
$b_{124} = -0,0004$	$b_{134} = 0,0042$	$b_{234} = 0,0042$
$b_{1,2,3,4} = 0,0101$		

Disperzija koeficijenata, odnosno njihovi kvadratni korijeni, izračunavani su po jednačini (2):

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N \cdot g} \dots \dots \dots 11$$

$$\Delta b_i = t_g; f_1 \cdot S_{b_i} \dots \dots \dots 12$$

gdje je:

$t$  — kriterijum Stjudenta (1, 2),

$$\text{za } q = 0,05 \text{ i } f_1 = 32; t_{0,05; 32} = 2,04.$$

Veličine  $S_{b_i}$  i  $\Delta b_i$ , izračunate prema jednačinama 11 i 12, iznose:

$$S_{b_i} = 0,00226$$

$$\Delta b_i = 0,0046.$$

U jednačini regresije uz svaku nezavisno promjenljivu komponentu nalaze se oni koeficijenti čija je apsolutna vrijednost jednaka ili veća od veličine  $\Delta b_i$ , pa na osnovu toga jednačina regresije za zavisno promjenljivu veličinu (atheziju prevlake za osnovu) glasi:

$$y = 0,1658 + 0,0072x_2 + 0,0337x_4 + 0,0056x_3x_4 + 0,0101x_1x_2x_3 + \\ + 0,0101x_1x_2x_3x_4 \dots \dots \dots 13$$

Računske vrijednosti za zavisno promjenljivu veličinu izračunate su po jednačini 13 i u tabl. 6. date su eksperimentalne i računске vrijednosti zavisno promjenljive veličine (athezije prevlake za osnovu).

Tabl. 6 — Poređenje eksperimentalnih i računskih vrijednosti  
za atheziju prevlake za osnovu  
Comparison of experimental and computed values  
for adhesion of coating for the base

Broj ogleada u	$y_u$ exp.	$y_u$ rač.	$\Delta y$	$\Delta y^2$
1	0,247	0,232	0,015	0,000225
2	0,183	0,192	0,009	0,000081
3	0,184	0,178	0,006	0,000036
4	0,204	0,218	0,014	0,000196
5	0,177	0,181	0,004	0,000016
6	0,220	0,221	0,001	0,000001
7	0,201	0,207	0,006	0,000036
8	0,181	0,166	0,015	0,000225
9	0,128	0,154	0,026	0,000676
10	0,128	0,113	0,015	0,000225
11	0,116	0,099	0,017	0,000289
12	0,131	0,139	0,008	0,000064
13	0,153	0,125	0,028	0,000784
14	0,149	0,165	0,016	0,000256
15	0,128	0,150	0,022	0,000484
16	0,124	0,110	0,014	0,000196
				$\Sigma$ 0,00369

Provjera adekvatnosti modela, odnosno jednačine regresije, izvedeno je pomoću jednačina:

$$S^2_{\text{nead.}} = \frac{\sum_{u=1}^N (y_u \text{ rač.} - \bar{y}_u \text{ exp.})^2}{f_2} \dots \dots \dots 14$$

gdje je:

- $y_u$  rač. — računska vrijednost zavisno promjenljive veličine u »u« ogledu,
- $\bar{y}_u$  — eksperimentalna vrijednost zavisno promjenljive u »u« ogledu,
- $f_2$  — broje stepena slobode prema jednačini:  
 $f_2 = N - k'$  . . . . . 15
- $k'$  — broj zadržanih koeficijenata u jednačini regresije, uključujući i koeficijent  $b_0$ , i

$$F_{f_2; f_1}^{\text{rač.}} = \frac{S^2_{\text{nead.}}}{S^2_y} \dots \dots \dots 16$$

gdje je:

- F — kriterijum za ocjenu adekvatnosti modela po Fišeru.
- Jednačina regresije adekvatna je ako je ispunjen uslov (2):

$$F^{\text{rač.}} \leq F_{f_2; f_1}^{\text{tabl.}} \dots \dots \dots 17$$

Stepen slobode  $f_2$ , izračunat prema jednačini 15, iznosi  $f_2 = 10$ .  
Disperzija adekvatnosti, izračunata prema jednačini 14, iznosi  $S^2_{\text{nead.}} = 0,001137$ .

Saglasno jednačini 16 i primjenom relacije 17 zaključuje se da adekvatnost prema kriterijumu Fišera nije ispunjena pošto je:

$$F_{0,05; 10; 32}^{\text{rač.}} = 4,57 > F_{0,05; 10; 32}^{\text{tabl.}} = 2,16$$

Adekvatnost modela prema kriterijumu Stjudenta:

$$t^{\text{rač.}} = \frac{(b_0 - y_0) \sqrt{N}}{S_y} \dots \dots \dots 18$$

gdje je:

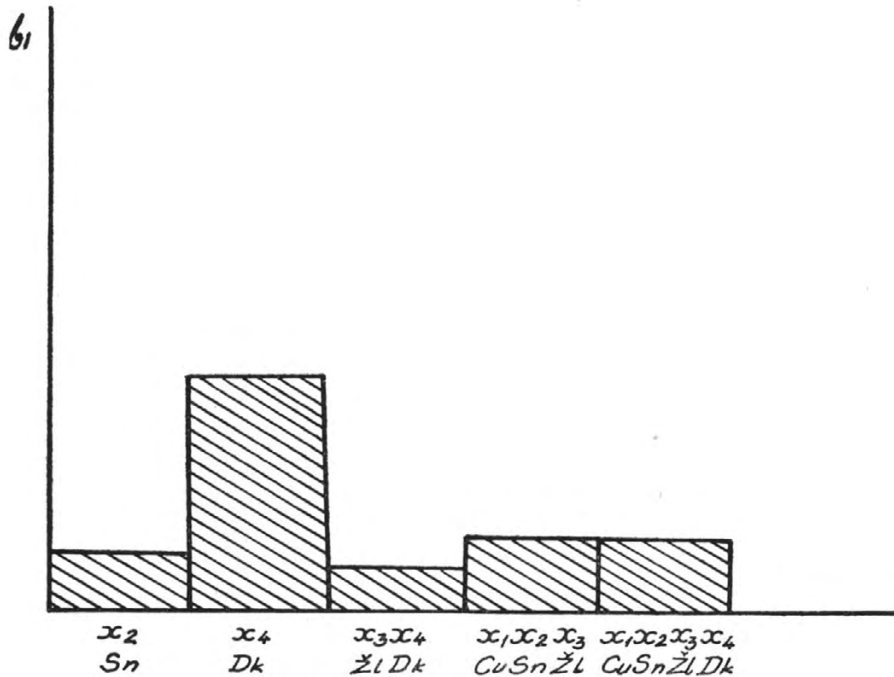
$s_y$  — kvadratni korijen srednje greške ogleada, određen za stepen slobode  $f_1$ ;

ispunjena je, s obzirom na to što je:

$$t^{\text{rač.}} = 1,47 < t_{0,05; 32}^{\text{tabl.}} = 2,04.$$

ANALIZA POSTAVLJENOG LINEARNOG MATEMATIČKOG MODELA I ZAKLJUČAK

Iz jednačine regresije 13 zaključuje se, a i na osnovu histograma (sl. 2), da na veličinu athezije prevlake za osnovu, od iza-



Sl. 2. Djelovanje faktora prema modelu 13

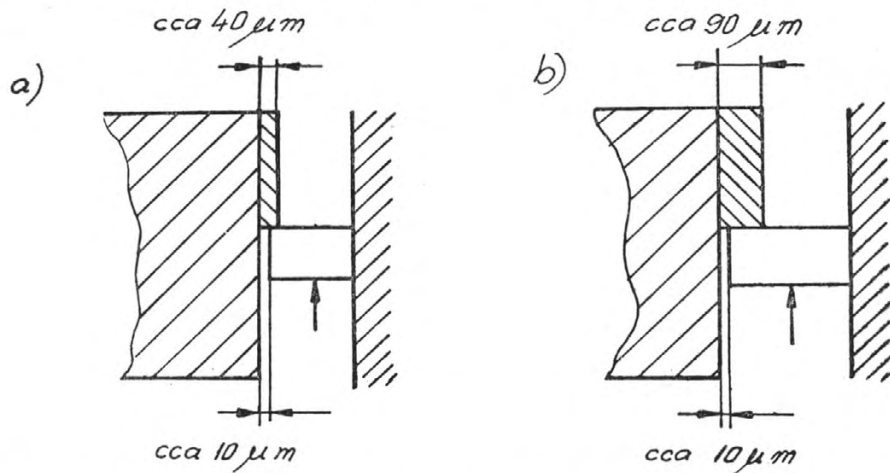
Fig. 2. Efficency of factors according to the model № 13

branih nezavisno promjenljivih veličina, najveći pozitivni uticaj ima katodna gustina struje i sadržaj jona kalaja (II) u rastvoru. Zajedničko djelovanje izabраниh faktora ( $x_3x_4$ ), ( $x_1x_2x_3$  i ( $x_1x_2x_3x_4$ ) takođe se pozitivno ogleda na zavisno promjenljivu veličinu.

Pozitivno djelovanje faktora  $x_2$  — sadržaj jona kalaja (II) u rastvoru — na veličinu athezije prevlake za osnovu objašnjava se povećanjem sadržaja kalaja u leguri olovo-kalaj-bakar, što dovodi do povećanja čvrstoće legure, koja se reflektuje na mjerenu veličinu napona smicanja unutar legure olovo-kalaj-bakar.

Uticaj faktora  $x_4$  (katodna gustina struje), takođe u pozitivnom smislu, na veličinu athezije prevlake za osnovu ogleda se u formiranju sitno kristalne strukture prevlake pri povećanim katodnim gustinama struje, što dovodi do povećane čvrstoće unutar same prevlake.

Mjerenjem napona smicanja unutar sloja prevlake, a da pri tome zaostali dio prevlake (u prikazanom slučaju mjerenja oko  $10 \mu\text{m}$ , sl. 3) ne pokazuje pojavu odvajanja od osnove, navodi na zaključak da je athezija između prevlake i osnove najmanje jednaka naponu smicanja unutar sloja prevlake, odnosno u izvršenim mjerenjima svakako je athezija prevlake za osnovu veća od napona smicanja unutar prevlake, s obzirom na to što nije došlo do pojave odvajanja preostalog sloja prevlake od osnove.



Sl. 3. Princip smicanja u sloju prevlake olovo-kalaj-bakar primijenjen za mjerenje athezije prevlake za osnovu a — prevlaka debljine oko  $40 \mu\text{m}$ , b — prevlaka debljine oko  $90 \mu\text{m}$

Fig. 3. Principle of shearing in the layer of coating lead-tin-copper applied for measuring adhesion of coating for the base a — coating approximately  $40 \mu\text{m}$  in thickness, b — coating approximately  $90 \mu\text{m}$  in thickness

Koristeći se postavljenim matematičkim modelom (jednačina 13), imajući u vidu da je prema kriterijumu Studenta ispunjena

adekvatnost, moguće je veoma uspješno izabrati vrijednost razmatranih nezavisno promjenljivih veličina, kod nepromijenjenih svih ostalih parametara, da bi se dobila najbolja adhezija prevlake za osnovu. Svakako, izbor vrijednosti nezavisno promjenljivih veličina mora biti optimiziran prema ostalim modelima, kao što je debljina prevlake, hemijski sastav prevlake, tvrdoća prevlake i dr., što u ovom radu nije analizirano.

#### LITERATURA

- (1) Bodnar A. G., Matematičeskoe modelirovanie v hemičeskoj tehnologii, Izdateljstvo »Višaja škola«, Kiev, 1973.
- (2) Novik F. C., Arsov Y. B., Optimizacija procesov tehnologii metalov metodami planirovania eksperimentov »Mašinostroenije« Moskva, »Tehnika«, Sofia, 1980.

#### THE OPTIMIZATION OF ELECTROCHEMICAL DEPOSITION LEAD-TIN 10-COPPER 3 ALLOY ON NICKEL-PLATING BASE OF LEAD BRONZE, FROM THE ASPECT OF REACHING THE BEST ADHEZION BETWEEN THE COATING AND BASE

by

**Marko S. SUDIĆ**

#### Summary

The subject of the work deals with electrochemical deposition of lead-tin-copper alloy on the sliding bearing, manufactured of lead bronze, and quantitative measurement of adhesion between the coating and base.

Applying a method of mathematical modelling it was proceeded from the assumption that between chosen independent variable values (factors) was determined their influence on dependent variable value (adhesion of coating for base) in state of unchangable all other parameters.

By deriving complete factorial experiment we reached a regression equation which was applied, between selected factors, to obtain alloy coating lead-tin-copper with best adhesion to the base.

