

S. M. MILIĆ  
M. M. ANTONIJEVIĆ

Originalni naučni rad  
UDC: 669.33.053.4=861

## Elektrohemijsko ponašanje bakra u alkalnom rastvoru u prisustvu benzotriazola i hloridnih jona

*U ovom radu je ispitivano elektrohemijsko ponašanje bakra u rastvoru natrijum-tetraborata (boraksa) u prisustvu i odsustvu hloridnih jona. Takođe, ispitivan je i uticaj benzotriazola (BTA) na anodno ponašanje bakra. Nađeno je da se na bakru grade oksidi  $\text{Cu}_2\text{O}$  i  $\text{CuO}$  i da se potencijal pikova pomera u pozitivnu stranu sa vremenom stajanja u rastvoru boraksa. Stajanjem  $\text{Cu}$  elektrode od 1 h u rastvoru boraksa koji sadrži različite koncentracije hloridnih jona (0,001; 0,010; 0,050 i 0,100 mol/dm<sup>3</sup> Cl<sup>-</sup>) ispoljava se aktivatorsko dejstvo tih jona, dok stajanjem bakra u vremenu od 6 h u navedenim rastvorima, hloridni joni su imali, pored aktivacionog, i pasivacioni efekat. Prilikom ispitivanja uticaja benzotriazola, nađeno je da BTA ispoljava inhibitori efekat i u slučaju različitih vremena ekspozicije, kao i pri različitim koncentracijama BTA. Na osnovu Langmuir-ove adsorpcione izoterme, nađena je vrednost za adsorpcionu slobodnu energiju  $\Delta G = -35,4$  kJ/mol.*

**Ključne reči:** elektrohemijsko ponašanje, bakar, benzotriazol, hloridni joni, Langmuir-ova adsorpciona izoterma

### 1. UVOD

Bakar zbog svojih dobrih osobina ima široku primenu (u proizvodnji žice, limova, cevi, u kompjuterskoj i mikroelektronskoj industriji, dobijanju širokog spektra legura, kao konstrukcioni materijal u sistemima za hlađenje nuklearnih instalacija, automobilske industriji, energetici, naftnim rafinerijama, fabrikama šećera, pomorskom okruženju). Ovako velika primena bakra je zasnovana na njegovim mehaničkim i električnim osobinama, kao i njegovom pasivacionom ponašanju i strukturi njegovog anodnog oksidnog sloja.

Iako je bakar u velikoj meri otporan na uticaj atmosfere i hemijskih agenasa, on u rastvorima hlorida podleže koroziji. Značajan broj istraživača [1-9] ispituje mehanizam rastvaranja bakra u ovim rastvorima. Oni mehanizam rastvaranja bakra tumače na različite načine, u zavisnosti od koncentracije hloridnih jona i pH rastvora. Neki autori nalaze pasivaciono dejstvo hloridnih jona [2-4], dok drugi ukazuju na njihovo aktivatorsko dejstvo na brzinu rastvaranja bakra [1, 8, 9]. Kod produkata korozije bakra autori uglavnom uočavaju formiranje sledećih vrsta:  $\text{CuCl}$  [2-4],  $\text{Cu}_2\text{O}$  [5, 6, 10],  $\text{CuCl}_2^-$  [8, 9],  $\text{CuO}$  [5, 6],  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  [2, 4],  $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$  [10],  $\text{CuCl}_3^{2-}$  [11] i  $\text{CuCl}_4^{3-}$  [11].

Adresa autora: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, P.Fah 50, 19 210 Bor, Republika Srbija

Mogućnost prevencije korozije bakra privukla je veliki broj istraživača tako da je do danas ispitano veliki broj mogućih inhibitora. Među njima su i neorganski inhibitori [12-14], ali mnogobrojnija su organska jedinjenja i njihovi derivati, kao što su jedinjenja iz grupe azola [15-24], amini [25-29], amino kiseline [30, 31] i mnoga druga. Primećeno je da prisustvo heteroatoma kao što su azot, sumpor, fosfor, u molekulu organskog jedinjenja, poboljšava njegovo dejstvo kao inhibitora korozije bakra. To se objašnjava prisustvom nepopunjenih  $d$  orbitala u atomu  $\text{Cu}$ , koji sa atomima koji imaju mogućnost da daju elektrone, grade koordinativne veze. Takođe je prisutna i interakcija sa prstenovima sa konjugovanim vezama tj.  $\pi$  elektronima.

Uticaj inhibitora benzotriazola na koroziono ponašanje bakra i legura bakra, izučavan je u velikom broju radova [15, 32-39]. Zaštitni efekat BTA se zasniva na formiranju polimernog filma  $[\text{Cu}(\text{I})\text{BTA}]_n$  na površini elektrode [15, 37]. Ranije studije sugerišu da je za formiranje  $\text{CuBTA}$  filma prisustvo  $\text{Cu}_2\text{O}$  neophodno [40, 41], ali u nekim radovima [42, 43] iznose se podaci koji ukazuju da se zaštitni film formira i na slobodnoj površini bakra.

Modestov sa saradnicima, u svojim radovima [44, 45] analizira ponašanje  $\text{Cu}$  elektrode u prisustvu  $\text{Cl}^-$  i benzotriazola u kiseljoj, neutralnoj [44] i baznoj sredini [45]. On pretpostavlja da uz formiranje zaštitnog filma  $\text{CuBTA}$ , dolazi i do nastajanja slojeva  $\text{Cu}_2\text{O}$  i  $\text{CuO}$  (u baznoj sredini), ali ispod  $\text{CuBTA}$ , a da je uloga  $\text{CuBTA}$  u stabilizaciji donjih podslojeva

oksida bakra (prvenstveno  $\text{Cu}_2\text{O}$ ). Chen [46] analizira strukturu i kinetiku porasta površinskog kompleksnog filma na bakru, u rastvoru  $\text{NaCl}$  ( $\text{pH} = 9$ ), sa niskim sadržajem BTA. On nalazi da je u slučajevima kada su koncentracije benzotriazola u tretiranom rastvoru:  $0 \text{ mM} < 0,17 \text{ mM} > 0,17 \text{ mM}$ , porast zaštitnog filma moguće je definisati linearnim, paraboličnim ili logaritamskim zakonima, respektivno. Istovremeno, odgovarajuće strukture površinskog filma na bakru su multislojevi sastava:  $\text{Cu} / \text{Cu-Cu}_2\text{O}$ ;  $\text{Cu} / \text{Cu} - \text{Cu}_2\text{O} / \text{CuO} - \text{Cu(I)BTA}$  i  $\text{Cu} / \text{Cu} - \text{Cu}_2\text{O} - \text{Cu(I)BTA}$ , respektivno (za date koncentracije inhibitora). Chen nalazi i da se sa porastom koncentracije benzotriazola u površinskom zaštitnom filmu ne detektuje  $\text{CuO}$ .

U ovom radu će se ispitivati anodno ponašanje bakra u rastvorima natrijum-tetraborata u prisustvu i odsustvu hloridnih jona. Pored ovoga, ispitivati će se efekat stajanja  $\text{Cu}$  elektrode u rastvoru BTA, kao i uticaj koncentracije BTA na njegovo inhibitorско dejstvo i stepen pokrivenosti. Analiziraće se i uticaj hloridnih jona na elektrohemijско ponašanje bakra, ali nakon obrazovanja polimernog zaštitnog filma na površini elektrode. Dobijeni rezultati će se uporediti sa rezultatima drugih autora.

## 2. EKSPERIMENTALNI DEO

Elektrohemijско ponašanje bakra u alkalnom rastvoru, u prisustvu benzotriazola i hloridnih jona, ispitivano je korišćenjem aparature kod koje je potencijostat bio direktno povezan na kompjuter preko AD kartice. Kao radna elektroda korišćena je elektroda od bakra, radne površine  $0,49 \text{ cm}^2$ , dobijena metodom livenja uvis. Pre svakog merenja bakarna elektroda je polirana glicinom ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), čestica krupnoće  $1 \text{ }\mu\text{m}$ , ispirana destilovanom vodom i sušena. Eksperimenti su izvođeni korišćenjem kompjuterizovanog potencijostata sa troelektrodnim sistemom. Kao referentna elektroda korišćena je zasićena kalomelova elektroda (ZKE), a pomoćna je bila od platine, površine  $2,5 \text{ cm}^2$ . Od metoda su korišćene: merenje potencijala otvorenog kola i ciklična voltametrijа. Potencijal otvorenog kola određivan je tokom 10 minuta, a zatim su, u anodnom smeru, od potencijala otvorenog kola, snimani ciklični voltamogrami. Sva merenja su izvođena pri brzini polarizacije od  $10 \text{ mV/s}$ , na sobnoj temperaturi u rastvorima koji su prirodno aerisani. Potencijal je izražavan u odnosu na potencijal zasićene kalomelove elektrode.

Elektrohemijско ponašanje bakarne elektrode ispitivano je u rastvoru natrijum-tetraborata (boraksa), u prisustvu hloridnih jona, kao i u prisustvu benzotriazola ( $\text{C}_6\text{H}_4\text{N}_3\text{H}$ ), tako što je:

- vršena polarizacija  $\text{Cu}$  elektrode u rastvoru  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  natrijum-tetraborata nakon različitih vremena stajanja elektrode u njemu (10 min, 1 h, 24 h i 76 h).
- bakarna elektroda stajala određeno vreme (1 h i 6 h) u rastvoru  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  natrijum-tetraborata koji je sadržavao različite koncentracije hloridnih jona (0,001; 0,010; 0,050 i  $0,100 \text{ mol/dm}^3 \text{ Cl}^-$ ), ispirana destilovanom vodom i prenošena u rastvor  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  boraksa, u kome je odmah izvođena polarizacija.
- vršena polarizacija odmah nakon uranjanja bakarne elektrode u rastvor benzotriazola (BTA) različitih koncentracija ( $8,4 \cdot 10^{-7}$ ;  $8,4 \cdot 10^{-6}$ ;  $8,4 \cdot 10^{-5}$ ;  $8,4 \cdot 10^{-4}$  i  $8,4 \cdot 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$  BTA u rastvoru  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  natrijum-tetraborata).
- elektroda  $\text{Cu}$  stajala određeno vreme (15 min, 1 h, 4 h i 48h) u  $0,2 \%$  ( $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ mol/dm}^3$ ) benzotriazolu, ispirana destilovanom vodom i prenošena u rastvor  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  boraksa, u kome je odmah izvođena polarizacija.
- bakarna elektroda stajala 1h u  $0,2 \%$  ( $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ mol/dm}^3$ ) benzotriazolu, ispirana destilovanom vodom i prenošena u rastvor  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  natrijum-tetraborata koji je sadržavao hloridne jone (0,010; 0,050; 0,100 i  $0,500 \text{ mol/dm}^3 \text{ Cl}^-$ ) u kome je odmah vršena polarizacija.

## 3. REZULTATI I DISKUSIJA

### 3.1. Uticaj vremena stajanja

Potencijal otvorenog kola ( $E_{\text{ocp}}$ ) bakra (tabl. 1) pri različitim vremenima stajanja elektrode u rastvoru natrijum-tetraborata nalazi se u opsegu  $-0,044 \text{ V}$  do  $-0,016 \text{ V}$  vs. ZKE. Najnegativniji potencijal bakra je nakon deset minuta stajanja ( $-0,044 \text{ V}$ ), a najpozitivniji je nakon stajanja bakra od 1h u ispitivanom rastvoru. Pošto su eksperimenti izvođeni u prirodno aerisanim rastvorima, stajanjem bakarne elektrode od 1h u tim rastvorima, površina bakra se najverovatnije prekriva slojem oksida pri čemu sistem  $\text{Cu}_x/\text{Cu}$  ima pozitivniji potencijal. Sa daljim vremenom stajanja najverovatnije nagrađeni oksidi bakra postaju porozniji što dovodi do otkrivanja površine bakra i do neznatnog pomeranja potencijala u negativnu stranu.

Sa cikličnih voltamograma (slika 1) se vidi, da u anodnim delovima krivih postoje pikovi ( $E_{\text{p1}}$ ) u nižim oblastima potencijala ( $0,100 - 0,200 \text{ V}$  vs. ZKE), kao i u pozitivnijoj oblasti ( $0,560 - 0,610 \text{ V}$  vs. ZKE), označenih kao  $E_{\text{p2}}$ . Vrednosti potencijala pikova i odgovarajuće gustine struja su prikazani u tabeli 1. Iz literaturnih podataka [7, 10, 47-50] i E-pH dijagrama [33, 51] može se zaključiti da potencijal  $E_{\text{p1}}$  odgovara građenju  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Na tom potencijalu se dešava

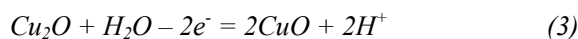
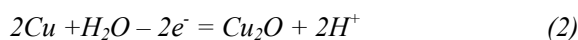
oksidacija Cu do  $\text{Cu}^+$  ( $\text{Cu} - e^- = \text{Cu}^+$ ), a zavisnost potencijala od koncentracije  $\text{Cu}^+$  jona, prikazuje se jednačinom [33]:

$$E_{\text{Cu}^+/\text{Cu}} = +0.521 + 0.0591 \log[\text{Cu}^+], V_{\text{SHE}} \quad (1)$$

U oblasti potencijala  $E_{\text{p}2}$  odigrava se oksidacija filma  $\text{Cu}_2\text{O}$  do  $\text{CuO}$  [5, 6, 11, 45, 49, 52-57]. Pošto se polarizacija bakra vrši u baznoj sredini, moguće je i formiranje baznih jedinjenja bakra u oblasti potencijala ( $E_{\text{p}2}$ ). Kabasakaloglu i Mamas sa saradnicima [2, 4], ispitivali su elektrohemijsko ponašanje bakra u rastvoru  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  NaCl i našli da se na potencijalima bliskim  $E_{\text{p}2}$  grade hidroksidi. Do sličnog zaključka došao je i Kunze sa saradnicima [58] istražujući elektrohemijsko ponašanje bakra u rastvoru  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  NaOH.

Osim ovoga, sa polarizacionih krivih se uočava i

pomeranje potencijala pikova  $E_{\text{p}1}$  sa vremenom stajanja u pozitivniju oblast potencijala (tabela 1). Uočeno pomeranje pikova može se tumačiti time što se u tom sistemu mogu odigravati sledeće reakcije [52]:

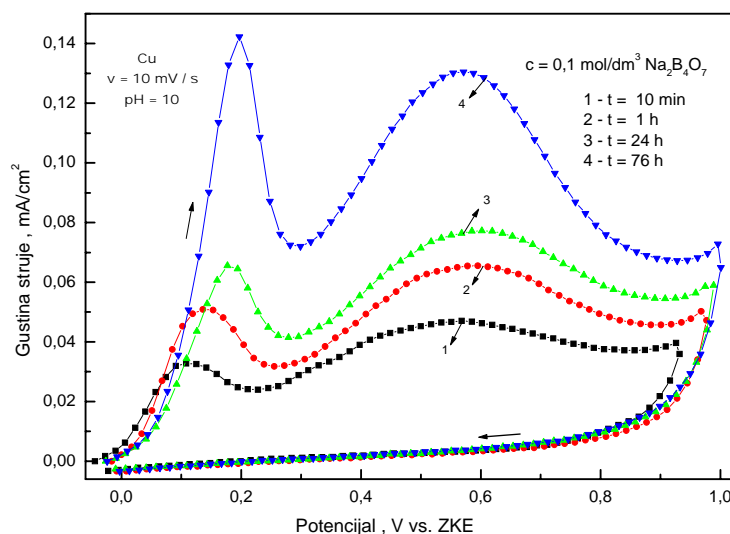


Iz jednačina 2-4 se očava da prilikom formiranja oksida / hidroksida, dolazi do generisanja protona. Usled generisanja protona smanjuje se pH vrednost prielektrodnog sloja, a to dovodi do pomeranja potencijala prvih pikova ( $E_{\text{p}1}$ ) u pozitivnu stranu, jer se potencijal sistema  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}$ , na osnovu termodinamičkih podataka [52] može pisati kao:

$$E_{\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}} = +0,461 - 0,0591 (\text{pH}), V_{\text{SHE}} \quad (5)$$

Tabela 1 - Vrednosti potencijala otvorenog kola, gustina struje i potencijala prvih i drugih anodnih pikova Cu elektrode sa vremenom, u  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  boraksu

Vreme	10 min	1 h	24 h	76 h
$E_{\text{ocp}}, \text{V}$	-0,044	-0,016	-0,026	-0,024
$E_{\text{p}1}, \text{V}$	0,108	0,136	0,177	0,197
$j_{\text{p}1}, \text{mA/cm}^2$	0,033	0,051	0,066	0,142
$E_{\text{p}2}, \text{V}$	0,568	0,578	0,602	0,571
$j_{\text{p}2}, \text{mA/cm}^2$	0,047	0,066	0,077	0,130



Slika 1 - Polarizacione krive elektrode bakra (1 - 10 min; 2 - 1 h; 3 - 24 h i 4 - 76 h) u rastvoru  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  boraksa pri različitom vremenu stajanja elektrode u tom rastvoru;  $v = 10 \text{ mV/s}$

Povećanje gustine struje sa povećanjem vremena stajanja bakra u rastvoru natrijum-tetraborata može se tumačiti time što se površina bakra prevlači filmo-

vima oksida koji se vremenom mogu rastvarati i menjati poroznost, kao što je zaključeno na bazi merenja potencijala otvorenog kola. Zbog toga površina bakra

nije uniformna, što može da dovodi do formiranja anodno-katodnih spregova. Katodne oblasti se nalaze na filmovima oksida, a anodne na slobodnom metalu. Ovi spregovi sa vremenom, mogu dovesti do pojave piting korozije usled čega se povećava površina bakra, pa se prilikom polarizacije javljaju i veće gustine struja.

### 3.2. Uticaj hloridnih jona

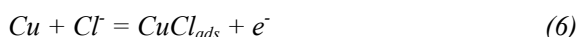
U tabeli 2 su prikazane vrednosti potencijala otvorenog kola bakarne elektrode u funkciji koncentracije hloridnih jona za vremena stajanja elektrode u ispitivanim rastvorima od 1 h i 6 h.

Tabela 2 - Vrednosti potencijala otvorenog kola Cu elektrode u rastvoru 0,1 mol/dm<sup>3</sup> boraksa i Cl<sup>-</sup> jona različitih koncentracija posle t = 1 h i t = 6 h stajanja u njima

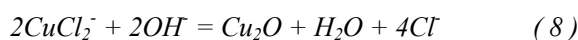
Koncentracija Cl <sup>-</sup> , mol/dm <sup>3</sup>	Potencijal otvorenog kola, V vs. ZKE	
	1 h	6 h
0,100	-0,075	-0,060
0,050	-0,071	-0,004
0,010	-0,048	-0,067
0,001	-0,067	-0,065

Iz date tabele se vidi, da se potencijal otvorenog kola kreće u intervalu od - 0,075 V do - 0,048 V i - 0,065 V do - 0,004 V vs. ZKE, za vremena stajanja od 1 h i 6 h, respektivno. Iz tabele 1 se vidi da je potencijal otvorenog kola bakarne elektrode koja je stajala 1 h u rastvoru natrijum-tetraborata bez hloridnih jona nešto pozitivniji (- 0,016 V) od ovih vrednosti potencijala. U radovima Kear-a i Lal-a sa saradnicima [59, 60], takođe se navodi da se sa porastom koncentracije hloridnih jona, potencijali otvorenog kola pomeraju u negativnu oblast.

Sa polarizacionih krivih dobijenih polarizacijom bakra u rastvorima sa različitim koncentracijom hloridnih jona i pri vremenu stajanja Cu elektrode od 1 h u tim rastvorima (slika 2, krive 2-5) se uočavaju dva pika, od kojih je pik na nižim potencijalima izraženiji od drugog pika koji se javlja na pozitivnijim potencijalima. Vidi se da sa porastom koncentracije hloridnih jona raste gustina struje prvog pika, i ta gustina struje je, u svim slučajevima, veća od odgovarajuće gustine struje određene sa polarizacione krive 1 – slika 2, koja je dobijena polarizacijom bakra u natrijum-tetraboratu. Ovo ukazuje na to da hloridni joni imaju aktivatorsko dejstvo. Sličan uticaj hloridnih jona iznašli su i drugi autori [8, 9]. Usled aktivatorskog dejstva hloridnih jona, rastvaranje bakra se može odvijati po sledećim jednačinama [61]:



Bacarella i Griess su naši da anodno rastvaranje bakra nije aktivaciono kontrolisano, već da brzina rastvaranja bakra zavisi od difuzije rastvornih formi CuCl<sub>2</sub><sup>-</sup> u masu rastvora [9]. Kear sa saradnicima je našao da se pikovi grade usled stvaranja CuCl na površini bakra, ali da nagrađeni sloj može sadržavati i Cu<sub>2</sub>O usled hidrolize CuCl<sub>2</sub><sup>-</sup> jona [48]:



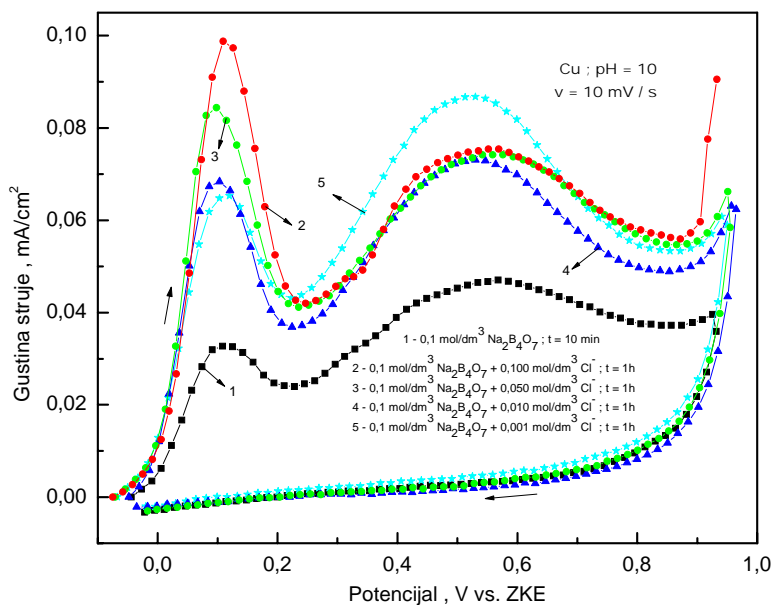
Ako se uporede potencijali prvih pikova sa potencijalom pika sa krive 1, vidi se da su približnih vrednosti. To može da ukazuje da se na tim potencijalima, u rastvorima hloridnih jona, gradi i Cu<sub>2</sub>O na površini bakra. Chailvo sa saradnicima [47] je našao da se u boratnom puferu koji sadrži hloridne jone, istovremeno grade i Cu<sub>2</sub>O i CuCl, a Guo-Ding Zhou sa saradnicima [7] nalazi da je oksidni sloj Cu<sub>2</sub>O u boratnom puferu, koji sadrži visoke koncentracije Cl<sup>-</sup> jona, dopingovan Cl<sup>-</sup> jonima, što je u saglasnosti sa rezultatima prikazanim u ovom radu.

Što se tiče gustina struja i potencijala drugih pikova, sa slike 2 može se videti da koncentracija hloridnih jona nema neki veliki uticaj na formiranje produkata oksidacije, osim koncentracije 0,001 mol/dm<sup>3</sup>. Već je rečeno da se na tim potencijalima mogu graditi razne forme Cu(II) jedinjenja, od kojih je načešće zastupljen CuO. Takođe, Kear sa saradnicima je našao, da se u hloridnoj sredini na višim potencijalima povećanje gustine struje može tumačiti stvaranjem Cu(II) specija [59]. Kod najniže koncentracije hloridnih jona (0,001 mol/dm<sup>3</sup>) prvi pik je najmanji, što može da ukaže, da se pri tim uslovima gradi manja količina CuCl i Cu<sub>2</sub>O, koji mogu imati zaštitna svojstva, pa se zbog toga javlja veća gustina struje na drugom piku. Warraky sa saradnicima u svom radu je iznašao, vršeći anodnu polarizaciju bakra u baznoj sredini, da Cu<sub>2</sub>O može imati zaštitno svojstvo [62].

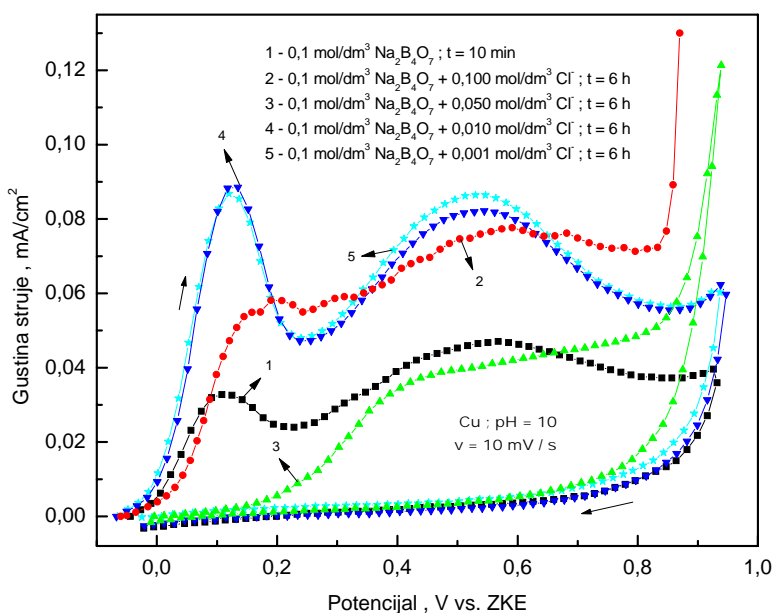
Aktivatorsko dejstvo hloridnih jona nižih koncentracija (0,001 i 0,010 mol/dm<sup>3</sup>) je izraženije u slučaju kada je izloženost bakarne elektrode njihovom dejstvu 6 h, što se može videti na Slici 3. Struje prvih pikova su 0,0883 i 0,0886 mA/cm<sup>2</sup> za navedene koncentracije, a to su veće vrednosti od 0,0653 i 0,0684 mA/cm<sup>2</sup> koje su dobijene sa Slike 2, za iste koncentracije hloridnih jona. U rastvoru hlorida (0,050 mol/dm<sup>3</sup>) na polarizacionoj krivoj, na nižim potencijalima, nema prvog pika (slika 3 – kriva 3). To se može objasniti najverovatnije pasivacionim delovanjem Cl<sup>-</sup> jona i stvaranjem gustog filma Cu<sub>2</sub>O + CuCl na površini elektrode. I drugi autori su došli do sličnih zaključaka. Ilkhchi sa saradnicima je u

svojim istraživanjima našao da hloridni joni mogu pasivirati površinu bakra [63]. Kod najveće ispitivane koncentracije Cl<sup>-</sup> jona (0,100 mol/dm<sup>3</sup>) ponovo se javlja aktivaciono dejstvo ovih jona, s tim što nema

dobro definisanih anodnih pikova, a gustina struje u širokom opsegu potencijala je manja nego što je to na nižim koncentracijama.



Slika 2 - Polarizacione krive elektrode bakra: a) u rastvoru 0,1 mol/dm<sup>3</sup> boraksa bez hloridnih jona ( $t = 10$  min); b) u rastvoru 0,1 mol/dm<sup>3</sup> boraksa koji je sadržavao hloridne jone (2 – 0,100; 3 – 0,050; 4 – 0,010 i 5 – 0,001 mol/dm<sup>3</sup>); vreme izloženosti elektrode:  $t = 1$  h;  $v = 10$  mV/s

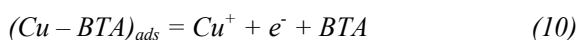


Slika 3 - Polarizacione krive elektrode bakra: a) u rastvoru 0,1 mol/dm<sup>3</sup> boraksa bez hloridnih jona ( $t = 10$  min); b) u rastvoru 0,1 mol/dm<sup>3</sup> boraksa koji je sadržavao hloridne jone (2 – 0,100; 3 – 0,050; 4 – 0,010 i 5 – 0,001 mol/dm<sup>3</sup>); vreme izloženosti elektrode:  $t = 6$  h;  $v = 10$  mV/s

## 3.3. Uticaj benzotriazola

## 3.3.1. Uticaj koncentracije BTA

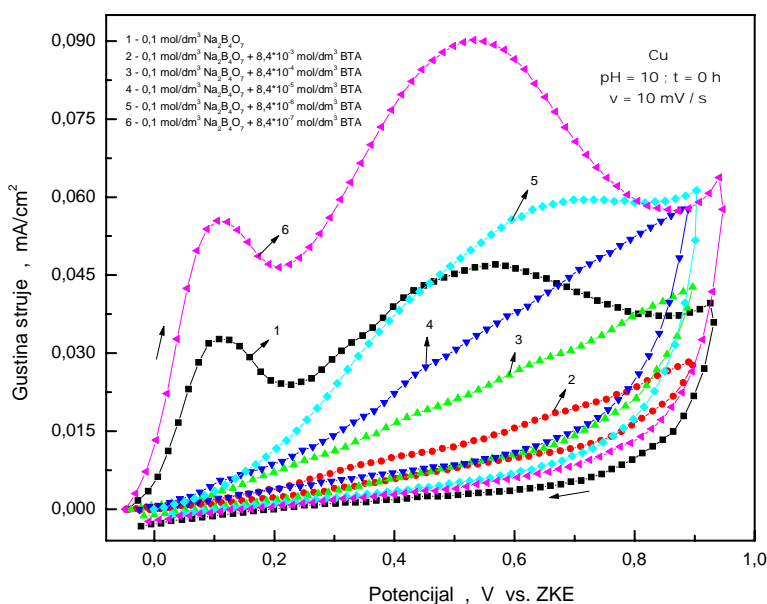
U rastvoru boraksa koji sadrži BTA nađeno je da su vrednosti potencijala otvorenog kola ispitivane elektrode u intervalu od  $-0,048$  V do  $-0,001$  V vs. ZKE. Polarizacione krive bakra u  $0,1 \text{ mol/dm}^3$   $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  koji je sadržavao različite koncentracije BTA prikazane su na slici 4. Sa te slike se uočava da najveći zaštitni efekat ima koncentracija benzotriazola od  $8,4 \cdot 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$ , i da sa daljim smanjivanjem koncentracije dolazi do porasta anodnih struja. Benzotriazol u ovim rastvorima ima inhibirajući efekat do koncentracije od  $8,4 \cdot 10^{-6} \text{ mol/dm}^3$ . Ovakav efekat benzotriazola je usled građenja  $[\text{Cu(I)BTA}]$  filma na površini elektrode [7, 15, 32]. Adsorpcija benzotriazola se vrši na površini bakra, a mehanizam inhibicije može se predstaviti sledećim jednačinama [33, 64, 65]:



Po ovom mehanizmu prvo se vrši adsorpcija molekula BTA uz stvaranje kompleksa  $(\text{Cu} - \text{BTA})_{\text{ads}}$  koji se zatim oksidiše dajući  $\text{Cu}^+$  jon. Istovremeno se dešava i zamena adsorbovanih molekula  $\text{H}_2\text{O}$  sa molekulima BTA. Nakon ovoga dolazi do interakcije iz-

među  $\text{BTA}_{\text{ads}}$  i jona bakra pri čemu se gradi polimerni film  $[\text{Cu(I)BTA}]_{\text{ads}}$  koji ima zaštitna svojstva. Sličan mehanizam adsorpcije BTA na bakru je izučavan od stane Bastidas-a [64] i Cano-a sa saradnicima [65].

Pored ovog zaštitnog efekta, na slici se može videti da najniža BTA koncentracija ima aktivatorsko dejstvo (slika 4, kriva 6). Pri nižim koncentracijama BTA na površini bakra se odigrava proces adsorpcije tog inhibitora uz stvaranje  $(\text{Cu-BTA})_{\text{ads}}$  koji je najverovatnije neravnomerno raspoređen po površini elektrode. Prilikom anodne polarizacije, reakcija oksidacije  $(\text{Cu-BTA})_{\text{ads}}$  je termodinamički moguća po jednačini (10) [33, 66]. Ali, kako navodi Fang [66], brzina te reakcije, pri maloj količini adsorbovanog kompleksa, je verovatno spora. Pored ovog produkta, na površini bakra zaostajace adsorpcioni kompleks  $(\text{Cu-BTA})_{\text{ads}}$ , a verovatno će se formirati i porozni sloj  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Pošto je zaštitni efekat BTA vezan za stvaranje  $[\text{Cu(I)BTA}]$  specije [40, 44-46, 66], onda će usled njenog nedostatka, dolaziti do povećanja anodne struje. U slučaju kada se polarizacija bakra izvodi u rastvorima bez inhibitora (slika 4, kriva 1), na površini bakra se stvara  $\text{Cu}_2\text{O}$  koji ima bolje zaštitno dejstvo od heterogenog filma nagrađenog na bakru pri polarizaciji u rastvorima BTA niskih koncentracija, koji se sastoji od  $(\text{Cu-BTA})_{\text{ads}}$  kompleksa,  $[\text{Cu(I)BTA}]_{\text{ads}}$  i  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Autori [24] su takođe našli aktivatorsko dejstvo BTA na nižim koncentracijama inhibitora.



Slika 4 - Polarizacione krive bakra u rastvoru  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  boraksa sa dodavanjem različitih koncentracija benzotriazola, snimano odmah nakon uranjanja elektrode u rastvor;  $v = 10 \text{ mV/s}$

Interakcija benzotriazola sa površinom bakra testirana je različitim adsorpcionim izotermama, pri čemu je Langmuir-ova izoterma dala najbolje rezultate. Stepenn pokrivenosti površine ( $\theta$ ) pri različitim koncentracijama benzotriazola određivan je korišćenjem izraza:

$$\theta = \frac{i_0 - i_{inh}}{i_0} \quad (13)$$

gde su:  $i_0$ ,  $i_{inh}$  – gustine struja u odsustvu i prisustvu inhibitora.

U tabeli 3 su date vrednosti stepena pokrivenosti za različite koncentracije inhibitora koje su određene sa polarizacionih krivih, sa slike 4.

Tabela 3 - Stepenn pokrivenosti u funkciji koncentracije benzotriazola

C inhibitora, mol/dm <sup>3</sup>	Stepenn pokrivenosti*
$8,4 \cdot 10^{-3}$	0,9890
$8,4 \cdot 10^{-4}$	0,8931
$8,4 \cdot 10^{-5}$	0,8662
$8,4 \cdot 10^{-6}$	0,8473

\*Stepenn pokrivenosti je određivan za podatke na 0,1 V vs.ZKE

Na slici 5 je data zavisnost  $C/\theta$  od C ( $C$  – koncentracija inhibitora, mol/dm<sup>3</sup>) istraživane bakarne elektrode (Langmuir-ova izoterma):

$$\frac{\theta}{1-\theta} = AC \exp\left(\frac{-q}{RT}\right) = KC \quad (14)$$

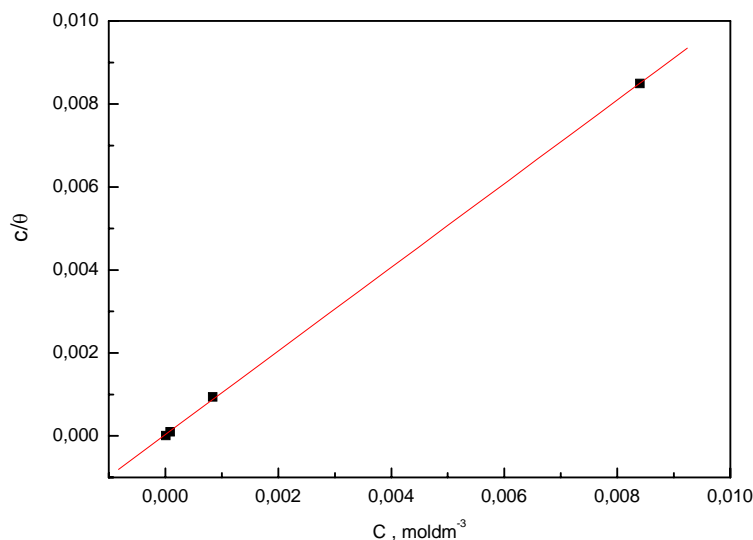
gde je:  $\theta$  – stepenn pokrivenosti,  $q$  – energija aktivacije,  $C$  – koncentracija inhibitora i  $K$  – konstanta adsorpcionog procesa. Jednačina (14) može da se prikaže i na sledeći način:

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C \quad (15)$$

Zavisnost konstante adsorpcionog procesa od adsorpcione slobodne energije daje se jednačinom [67]:

$$K = \left(\frac{1}{55,55}\right) \exp\left(\frac{-\Delta G_{ads}}{RT}\right) \quad (16)$$

gde su:  $R$  – univerzalna gasna konstanta i  $T$  – termodinamička temperatura.



Slika 5 - Zavisnost  $C/\theta$  od koncentracije inhibitora BTA

Iz prikazanih jednačina se vidi da zavisnost  $C/\theta$  od C treba da se pokorava linearnoj zavisnosti, sa odsečkom  $1/K$ . Korišćenjem jednačine 16 izračunava se vrednost adsorpcione slobodne energije. Obradom i korišćenjem slike 5 i jednačine 16 određena je vrednost za  $\Delta G_{ads} = -35,4$  kJ/mol. Ova vrednost za  $-\Delta G_{ads}$  u intervalu koncentracija benzotriazola od  $8,4 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> do  $8,4 \cdot 10^{-6}$  mol/dm<sup>3</sup> ukazuje na spo-

ntanu reakciju adsorpcije benzotriazola na površini bakra, kao i na zastupljenost hemisorpcije u interakciji inhibitora BTA i površine ispitivane bakarne elektrode.

### 3.3.2. Uticaj vremena ekspozicije

Uticaj vremena ekspozicije je ispitivan, tako što je ispitivana elektroda od bakra držana u rastvoru

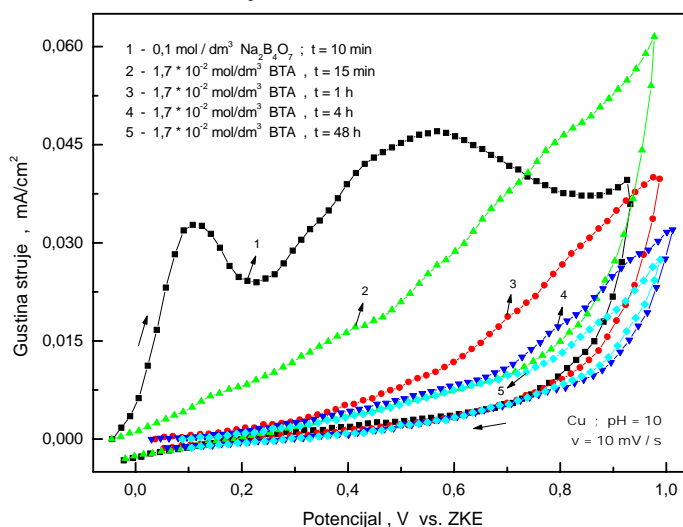
ovog inhibitora veće koncentracije,  $1,7 \cdot 10^{-2}$  mol/dm<sup>3</sup>, neko vreme (15 min, 1 h, 4 h i 48 h), a zatim ispirana i prenošena u rastvor 0,1 mol/dm<sup>3</sup> boraksa, u kome je vršena polarizacija. Rezultati ovih ispitivanja su prikazani na slici 6. Sa ove slike, kao i iz tabele 4, gde su prikazani stepeni pokrivenosti u funkciji vremena ekspozicije se vidi da i pri ovim uslovima BTA ima zaštitno dejstvo. Ako se uporede stepeni pokrivenosti koji su dati u tabelama 3 i 4, može se zaključiti da jače inhibitorско dejstvo pokazuje benzotriazol kada se ispitivana elektroda prvo tretira rastvorom inhibitora, a zatim se prenosi u rastvor boraksa, nego kada se u rastvor u kome se nalazi bakarna elektroda dodaje BTA odgovarajuće koncentracije. Ovo se može tumačiti time što se u rastvoru BTA ( $1,7 \cdot 10^{-2}$  mol/dm<sup>3</sup>), na površini bakra formira deblji polimerni zaštitni sloj usled prisustva veće koncentracije BTA

[68], kao i usled uticaja vremena ekspozicije. Autori [69] su našli da se prilikom tretmana bakra u rastvorima BTA u opsegu koncentracije 10 – 45 mM, na površini grade multislojevi koji doprinose boljoj zaštiti, što je u saglasnosti sa nađenim rezultatima u ovom radu.

Tabela 4 - Stepni pokrivenosti u funkciji vremena ekspozicije

Vreme ekspozicije, min	Stepni pokrivenosti*
15	0,8516
60	0,9962
240	0,9980
2880	0,9991

\*Stepni pokrivenosti je određivan za podatke na 0,1 V vs. ZKE



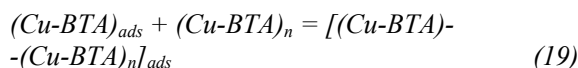
Slika 6 - Polarizacione krive bakra u rastvoru 0,1 mol/dm<sup>3</sup> boraksa (10 min) i rastvoru  $1,7 \cdot 10^{-2}$  mol/dm<sup>3</sup> BTA pri različitim vremenima stajanja (15 min, 1 h, 4 h i 48 h);  $v = 10$  mV/s

### 3.3.3. Uticaj hloridnih jona

U radu je istraživano i elektrohemijско ponašanje bakra u baznoj sredini na taj način što je elektroda stajala 1 h u rastvoru  $1,7 \cdot 10^{-2}$  mol/dm<sup>3</sup> BTA, zatim ispirana destilovanom vodom i prenošena u rastvore boraksa koji su sadržavali različite koncentracije Cl<sup>-</sup> jona (0,010; 0,050; 0,100 i 0,500 mol/dm<sup>3</sup>), a u kojima je odmah vršena polarizacija. Sa slike 7 se vidi da BTA u ovom slučaju ima zaštitno dejstvo u svim ispitivanim koncentracijama Cl<sup>-</sup> jona do potencijala približne vrednosti +0,300 V vs. ZKE.

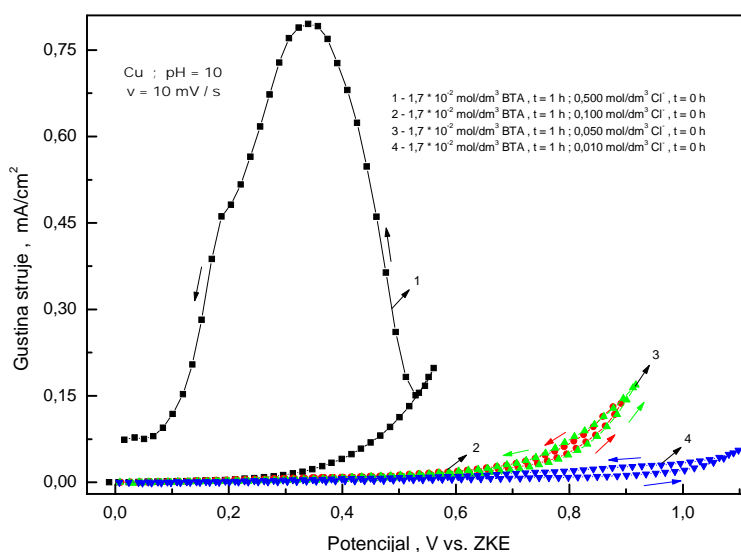
Na višim potencijalima, a naročito pri višim koncentracijama Cl<sup>-</sup> jona, zaštitni film na površini elektrode biva razoren. Sa slike 7 se vidi da potencijal prekida postaje sve negativniji sa porastom koncentracije Cl<sup>-</sup> jona. Tromans i Sun [33] su u svom radu, na bazi termodinamičkih podataka našli da formiranje CuCl<sub>2</sub><sup>-</sup> jona dovodi do destabilizacije formiranja

oksida bakra, koji su neophodni za formiranje zaštitnog [Cu(I)BTA] filma, što ima za posledicu povećanje korozije bakra. Taj efekat je naročito izražen pri većim koncentracijama hloridnih jona gde se favorizuje stvaranje CuCl<sub>2</sub><sup>-</sup> jona. Mehanizam formiranja zaštitnog filma, na bazi rada [33], može se prikazati sledećim jednačinama:



Kritičan je prvi stadijum adsorpcije BTA na površini legure (jedačina 17). U drugom stadijumu (18) odigrava se reakcija između CuCl<sub>2</sub><sup>-</sup> i BTA pri čemu se stvara nerastvorna so Cu(I)-BTA, a u trećem stadijumu se stvara polimerni film koji ima zaštitna svojstva.





Slika 7 - Polarizacione krive bakra koja je stajala 1 h u rastvoru  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  boraksa sa  $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ mol/dm}^3$  BTA, ispirana destilovanom vodom i prenošena u rastvore boraksa koji je sadržavao različite koncentracije Cl jona, u kojima je odmah vršena polarizacija;  $v = 10 \text{ mV/s}$

U ovom radu, pri relativno visokim koncentracijama hloridnih jona ( $0,050$ ;  $0,100$  i  $0,500 \text{ mol/dm}^3$ ), nađeno je da dolazi do destrukcije zaštitnog filma [Cu(I)BTA], što je u saglasnosti sa Tromansovim nalazima.

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu izvedenih eksperimenata, obrade i analize dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Potencijal otvorenog kola ( $E_{ocp}$ ) bakra pri različitim vremenima stajanja elektrode u rastvoru natrijum-tetraborata nalazi se u opsegu  $-0,044 \text{ V}$  do  $-0,016 \text{ V}$  vs. ZKE. Sa cikličnih voltamograma, za Cu elektrodu, u rastvoru  $0,1 \text{ mol/dm}^3$  boraksa, nađeno je da u anodnim delovima krivih postoje pikovi koji odgovaraju građenju  $\text{Cu}_2\text{O}$  i  $\text{CuO}$ . Pored ovoga, sa polarizacionih krivih uočeno je i pomeranje anodnih pikova sa vremenom stajanja u pozitivniju oblast potencijala.
- Sa polarizacionih krivih dobijenih polarizacijom bakra u rastvorima sa različitim koncentracijama hloridnih jona ( $0,001$ ;  $0,010$ ;  $0,050$  i  $0,100 \text{ mol/dm}^3 \text{ Cl}^-$ ) i pri vremenu stajanja Cu elektrode od 1 h u tim rastvorima, uočena su dva pika, od kojih je pik na nižim potencijalima izraženiji od drugog pika koji se javlja na pozitivnijim potencijalima. Na nižim potencijalima, u rastvorima hloridnih jona, grade se  $\text{Cu}_2\text{O}$  i  $\text{CuCl}$  na površini

bakra, dok se na višim potencijalima gradi uglavnom  $\text{CuO}$ . Uočeno je aktivatorsko delovanje hloridnih jona, a u nekim slučajevima i pasivatorsko dejstvo tih jona.

- Benzotriazol u ispitivanim rastvorima ima inhibirajući efekat u opsegu koncentracija  $8,4 \cdot 10^{-6}$  do  $8,4 \cdot 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$  usled građenja [Cu(I)BTA]. Na najnižoj ispitivanoj koncentraciji BTA ( $8,4 \cdot 10^{-7} \text{ mol/dm}^3$ ) uočeno je i aktivatorsko dejstvo ovog jedinjenja na rastvaranje bakra. Vrednost od  $-35,4 \text{ kJ/mol}$  za adsorpcionu slobodnu energiju koja je nađena u ovom radu, ukazuje da je hemisorpcija zastupljena u interakciji benzotriazola i površine bakra. Stepenn pokrivenosti pokazuje da je veći zaštitni efekat benzotriazola u slučajevima veće izloženosti površine bakra rastvoru BTA.
- Nakon stajanja elektrode od 1 h u rastvoru BTA ( $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ mol/dm}^3$ ) i naknadne polarizacije u rastvorima boraksa koji je sadržavao hloridne jone relativno visokih koncentracija ( $0,050$ ;  $0,100$  i  $0,500 \text{ mol/dm}^3$ ), nađeno je da dolazi do destrukcije zaštitnog [Cu(I)BTA] filma.

#### ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije za finansiranje ovog rada u okviru projekta 142 012.

## LITERATURA

- [1] R.F.V.Villamil, P.Corio, J.C.Rubim, S.M.L. Agostinho, *J.Electroanal.Chem.*, 535 (2002) 75.
- [2] M.Kabasakaloglu, T.Kiyak, O.Sendil, A.Asan, *Applied Surface Science*, 193 (2002) 167.
- [3] R.M.El-Sherif, K.M.Ismail, W.A.Badawy, *Electrochimica Acta*, 49 (2004) 5139.
- [4] S.Mamas, T.Kiyak, M.Kabasakaloglu, A.Koc, *Materials Chemistry and Physics*, 93 (2005) 41.
- [5] J.L.Lei, Lj.Li, S.M.Cai, S.T.Zhang, D.Li, M.Z. Yang, *Acta Physico-Chimica Sinica*, 17, 12 (2001) 1107.
- [6] J.L.Lei, Lj.Li, S.T.Zhang, S.M.Cai, D.Li, M.Z. Yang, *Acta Chimica Sinica*, 59, 8 (2001) 1216.
- [7] G.D. Zhou, H. Shao, B.H.Loo, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 421 (1997) 129.
- [8] H.P.Lee, K.Nobe, *J.Electrochem.Soc.*, 133 (1986) 2035.
- [9] A.L.Bacarella, J.C.Griess, *J. Electrochem. Soc.*, 120 (1973) 459.
- [10] G.A.El-Magdy, *Corrosion Science*, 47 (2005) 1370.
- [11] H.Otmačić, E.Stupnišek-Lisac, *Electrochimica Acta*, 48 (2003) 985.
- [12] A.I.Muñoz, J.A.García, J.L.Guiñón, V.H.Pérez, *Electrochimica Acta*, 50 (2004) 957.
- [13] M.Edwards, L.Hidmi, D.Gladwel, *Corrosion Science*, 44 (2002) 1057.
- [14] M.Hourani, F.Wedian, *Corrosion Science*, 42, 12 (2000) 2131.
- [15] M.M.Antonijević, S.M.Milić, S.M.Šerbula, G.D. Bogdanović, *Electrochimica Acta*, 50 (2005) 3693.
- [16] E.M.Sherif, S.M.Park, *Corrosion Science*, 48, 12 (2006) 4065.
- [17] E.M.Sherif, A.M.Shamy, M.M.Ramla, A.O.H.El-Nazhawy, *Materials Chemistry and Physics*, 102 (2007) 231.
- [18] J. Bartley, N. Huynh, S.E. Bottle, H. Flitt, T. Notoya, D.P. Schweinsberg, *Corrosion Science*, 45 (2003) 81.
- [19] V.Otieno-Alego, N.Huynh, T.Notoya, S.E.Bottle, D.P.Schweinsberg, *Corrosion Science*, 41 (1999) 685.
- [20] M.G. Pavlović, Lj.J.Pavlović, I.D.Doroslovački, N.D.Nikolić, *Hydrometallurgy*, 73 (2004) 155.
- [21] W.J. Lee, *Materials Science and Engineering, A* 348 (2003) 217.
- [22] E.M.Sherif, R.M.Erasmus, J.D.Comins, *Journal of Colloid and Interface Science*, 309 (2007) 470.
- [23] A.Lalitha, S. Ramesh, S. Rajeswari, *Electrochimica Acta*, 51 (2005) 47.
- [24] A.M.Abdullah, F.M.Al-Kharafi, B.G.Ateya, *Scripta Materialia*, 54 (2006) 1673.
- [25] A.A.El Warraky, *Anti-corrosion Methods and Materials*, 50, 1 (2003) 40.
- [26] M.Ehteshamzade, T.Shahrabi, M.G.Hosseini, *Applied Surface Science*, 252 (2006) 2949.
- [27] H. Ma, S. Chen, L. Niu, S. Zhao, S. Li, D. Li, *Journal of Applied Electrochemistry*, 32 (2002) 65.
- [28] E.M.Sherif, S.M.Park, *Electrochimica Acta*, 51 (2006) 4665.
- [29] E.Stupnišek-Lisac, A.Brada, A.D.Mance, *Corrosion Science*, 42 (2000) 243.
- [30] G. Moretti, F.Guidi, *Corrosion Science*, 44 (2002) 1995.
- [31] J.B. Matos, L.P.Pereira, S.M.L.Agostinho, O.E.Barca, G.G.O.Cordeiro, E.D'Elia, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 570 (2004) 91.
- [32] J.M.Bastidas, P.Pinilla, E.Cano, J.L.Polo, S.Miguel, *Corrosion Science*, 45 (2003) 427.
- [33] D.Tromans, R.Sun, *J. Electrochem. Soc.*, 138, 11 (1991) 3235.
- [34] R.Subramanian, V.Lakshminarayanan, *Corrosion Science*, 44 (2002) 535.
- [35] R.Ravichandran, N.Rajendran, *Applied Surface Science*, 241, 3-4 (2005) 449.
- [36] W.Huang, S.Tamilmani, S.Raghavan, R.Small, *International Journal of Mineral Processing*, 72, 1-4 (2003) 365.
- [37] M.V.Rylkina, M.V.Didik, *Protection of Metals*, 43, 2 (2007) 179.
- [38] K.W.Chen, Y.L.Wang, *J.Electrochem.Soc.*, 154, 1 (2007) H41.
- [39] Y.N.Prasad, S.Ramanathan, *Electrochimica Acta*, 52, 22 (2007) 6353.
- [40] G.W.Poling, *Corrosion Science*, 10 (1970) 359.
- [41] P.G.Fox, G.Lewis, P.J.Boden, *Corrosion Science*, 19 (1979) 457.
- [42] V.Brusić, M.A.Frish, B.N.Eldridge, *J. Electrochem. Soc.*, 138 (1991) 2253.
- [43] K.Cho, J.Kishimoto, T.Hashizume, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 33 (1994) L 125.
- [44] A.D.Modestov, G.D.Zhou, Y.P.Wu, T.Notoya, D.P.Schweinsberg, *Corrosion Science*, 36, 11 (1994) 1931.
- [45] A.D.Modestov, G.D.Zhou, H.H.Ge, B.H.Loo, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 375, 1-2 (1994) 293.
- [46] J.H.Chen, Z.C.Lin, S.Chen, L.H.Nie, S.Z.Yao, *Electrochimica Acta*, 43, 3-4 (1998) 265.
- [47] M.R.G.de Chailvo, R.C.Salvareza, D.Vasquez Moll, A.J.Arvia, *Electrochimica Acta*, 30 (1985) 1501.
- [48] G. Kear, B.D.Barker, K.R.Stokes, F.C.Walsh, *Corrosion Science*, 47 (2004) 1694.
- [49] D.Tromans, *J. Electrochem. Soc.*, 145, 3 (1998) 44.
- [50] G.Bertrand, E.Rocca, C.Savall, C.Rapin, J.C.Labrune, P.Steinmetz, *J. Electroanal. Chem.*, 489 (2000) 38.

- [51] M.Pourbaix, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Pergamon, London (1966) 168.
- [52] D.Tromans, R.Sun, Journal of the Electrochemical Society, 139, 7 (1992) 1945.
- [53] M.Scendo, Corrosion Science, 49, 2 (2007) 373.
- [54] Y.Z.Hao, M.Z.Yang, C.Yu, S.M.Cai, G.D.Zhou, Thin Solid Films, 347 (1999) 289.
- [55] N.Huynh, S.E.Bottle, T.Notoya, D.P.Schweinsberg, Corrosion Science, 44 (2002) 2583.
- [56] W.Qafsaoui, C.Blanc, N.Pebere, H.Takenouiti, A.Shiri, G.Mankowski, Electrochimica Acta, 47, 27 (2002) 4339.
- [57] M.Bazzaoui, J.I.Martins, E.A.Bazzaoui, L.Martins, E.Machnikova, Electrochimica Acta, 52, 11 (2007) 3568.
- [58] J.Kunze, V.Maurice, L.H.Klein, H.H.Strehblow, P.Marcus, Corrosion Science, 46 (2004) 245.
- [59] G.Kear, B.D.Barker, F.C.Walsh, Corrosion Science, 46 (2004) 109.
- [60] H.Lal, H.R.Thirsk, Journal of the Chemical Society (1953) 2638.
- [61] D.Q.Zhang, L.X.Gao, G.D.Zhou, Applied Surface Science, 225 (2004) 287.
- [62] A.A.El Warraky, H.A. El Shayeb, E.M. Sherif, Egyptian Journal of Chemistry, 47, 6 (2004) 609.
- [63] M.O.Ilkhchi, H.Yoozbashizadeh, M.S.Safarzadeh, Chemical Engineering and Processing, 46, 8 (2007) 757.
- [64] D.M.Bastidas, Surface and Interface Analysis, 38 (2006) 1146.
- [65] E.Cano, J.L.Polo, A.La Iglesia, J.M.Bastidas, Adsorption, 10 (2004) 219.
- [66] B.S.Fang, C.G.Olson, D.W.Lynch, Surf. Sci., 476 (1986) 176.
- [67] M.Ehteshamzade, T.Shahrabi, M.G.Hosseini, Applied Surface Science, 252 (2006) 2949.
- [68] A.M.Fenelon, C.B.Breslin, J. Appl. Electrochemistry, 31 (2001) 509.
- [69] S.L.F.A.Da Costa, J.C.Rubim, S.M.L.Agostinho, Journal of Electroanalytical Chemistry, 220, 2 (1987) 259.

## ABSTRACT

### ELECTROCHEMICAL BEHAVIOUR OF COPPER IN PRESENCE OF BENZOTRIAZOLE AND CHLORIDE IONS IN ALKALINE SOLUTION

*In this paper, electrochemical behavior of copper in presence of benzotriazole and chloride ions in alkaline solution are presented. Influence of concentration of benzotriazole, concentration of chloride ions, immersion time on copper corrosion are investigated. It was found that  $\text{Cu}_2\text{O}$  and  $\text{CuO}$  were formed on copper during anodic polarization. The activation effect of  $\text{Cl}^-$  ions was found. The investigation of the effect of benzotriazole led to a conclusion that BTA has an inhibiting effect with increasing immersion times. Based on the Langmuir adsorption isotherm, the value of the standard free energy adsorption was found to be  $\Delta G^0 = -35.4 \text{ kJ/mol}$ .*

**Key words:** electrochemical behavior of copper, benzotriazole, copper, chloride ions Langmuir adsorption isotherm