

ALI RAMADAN ELKAIS<sup>1</sup>  
MILICA M GVOZDENOVIĆ<sup>1</sup>  
BRANIMIR Z. JUGOVIĆ<sup>2</sup>  
TOMISLAV LJ. TRIŠOVIĆ<sup>2</sup>  
MIODRAG M. MAKSIMOVIĆ<sup>1</sup>  
BRANIMIR N. GRGUR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tehnološko-metalurški fakultet,  
Univerzitet u Beogradu, Beograd,  
Srbija

<sup>2</sup>Institut tehničkih nauka Srpske  
akademije nauka i umetnosti,  
Beograd, Srbija

NAUČNI RAD

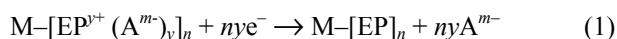
UDK 678.652:620.1/2:669

DOI: 10.2298/HEMIND100901069E

## SINTEZA I KOROZIONO PONAŠANJE POLI-ANILINA NA MEKOM ČELIKU, BAKRU I ALUMINIJUMU IZ BENZOATNIH RASTVORA

*U radu je ispitivana elektrohemijaska sinteza polianilina (PANI) na mekom čeliku, aluminijumu i bakru iz rastvora natrijum-benzoata i monomera anilina. Ustanovljeno je da se tanki, dobro adherentni, filmovi polianilina mogu formirati na svim ispitivanim metalima pri anodnim gustinama struja od 0,5–1,5 mA cm<sup>-2</sup>. Ispitivano je koroziono ponašanje metala sa prevlakom polianilina u rastvoru 0,5 mol dm<sup>-3</sup> NaCl (3%). Ustanovljeno je da ove prevlake pružaju korozionu zaštitu svim ispitivanim metalima u datoj korozionoj sredini.*

Primena filmova elektroprovodnih polimera kao jednog od načina aktivne zaštite metala od korozije predstavlja novi vid zaštite baziran na potpunoj ili delimičnoj zameni katodnih reakcija korozije, redukcije kiseonika (u atmosferi odnosno kiselim, neutralnim i alkalnim rastvorima) ili vodoničnih jona (u kiseloj sredini) katodnom reakcijom redukcije (dedopovanja) elektroprovodnog polimera [1–3]:



gde je EP elektroprovodni polimer, A anjon (dopant), a y stepen dopovanja, uz odgovarajuću reakciju anodnog rastvaranja metala:



Za razliku od klasičnih premaza, kod prevlaka na bazi elektroprovodnih polimera tokom vremena dolazi do povećanja otpornosti filma (usled dedopovanja, odnosno otpuštanja anjona iz elektroprovodnog polimera) i povećanja stepena zaštite od korozije [2,3].

Osnovni problem pri elektrohemijaskom dobijanju filmova elektroprovodnih polimera na metalima predstavlja visok potencijal elektropolimerizacije od približno 0,7 do i preko 1 V, što uslovljava intenzivno rastvaranje metala. Iz tog razloga, pri sintezi se moraju koristiti rastvori elektrolita koji pasiviraju metal, čime se umanjuje rastvaranje, ali pri tome formirani film ne sme imati izolatorska svojstva čime bi se sprečilo taloženje elektroprovodnog polimera. Jedan takav primer je oksalna kiselina u čijim rastvorima su dobijene zadovoljavajuće karakteristike filmova polipirola ali uz znatno rastvaranje čelika u početnom periodu taloženja (takozvani indukcionni period) [2–5]. Polianilin, sa druge

strane, predstavlja izazovan materijal zbog znatno niže cene polazne sirovine (monomera anilin) od pirola. Camaleta je u seriji radova [6–8] ispitivao uslove taloženja polianilina na čeliku iz rastvora para-toluensulfonske kiseline, oksalne kiseline, kao i litijum-perhlorata. Iz svih rastvora dobijena je prevlaka, ali uz primetno rastvaranje čelika u početnom periodu polimerizacije.

U prethodnim radovima, ustanovljeno je da se tanke prevlake, od nekoliko μm polianilina mogu dobiti iz rastvora natrijum-benzoata na mekom čeliku, kao podloja za kataforetsko nanošenje epoksidnih prevlaka [9]. Ovakva kombinacija je pokazala neuobičajeno poboljšanje korozionih karakteristika sistema u odnosu na klasične kataforetske prevlake u kiselim i neutralnim rastvorima [10,11].

Cilj ovoga rada je da se ispituju uslovi elektropolimerizacije tankih filmova polianilina iz rastvora natrijum-benzoata i korozione karakteristike na čeliku, aluminijumu i bakru kao jednih od najznačajnijih konstrukcionih materijala.

### EKSPERIMENTALNI DEO

Elektrohemijaska sinteza polianilina ispitivana je u 0,5 M natrijum-benzoata (p.a. Merck) uz dodatak anilina (predhodno destilisanog u atmosferi argona) koncentracije 0,1 M. Svi eksperimenti su urađeni u trodelnoj staklenoj elektrohemijaskoj ćeliji zapremine 150 cm<sup>3</sup> u prisustvu vazduha. Radne elektrode su bile od mekog čelika Č1212, aluminijuma i bakra (p.a. čistoće). Korišćene su elektrode dimenzija 1×1 cm sa ukupnom površinom od 2 cm<sup>2</sup>. Kontra elektroda je bila mrežica od platine površine oko 5 cm<sup>2</sup>, a referentna elektroda je bila zasićena kalomelova elektroda. Eksperimentalna debljina filma polianilina je procenjena merenjem mase uzoraka pre i posle elektropolimerizacije. Koroziono ponašanje metala sa prevlakom polianilina je ispitivano u 3%

Autor za prepisku: B.N. Grgur, Tehnološko-metalurški fakultet, Karadžićeva 4, 11120 Beograd, Srbija.

E-pošta: bngrgur@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 1. septembar 2010.

Rad prihvaćen: 17. novembar 2010.

rastvoru (0,5 M) NaCl snimanjem polarizacionih krivih. Temperatura elektrolita u svim eksperimentima je bila sobna  $22 \pm 3$  °C

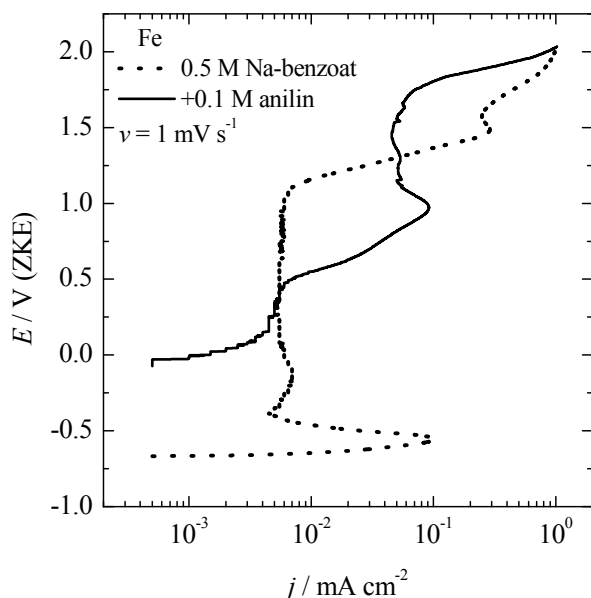
U svim eksperimentima je korišćen potenciostat/galvanostat PAR M273 u interaktivnoj vezi sa računom.

## REZULTATI I DISKUSIJA

### Sinteza polianilina na mekom čeliku, aluminijumu i bakru

#### Sinteza polianilina na mekom čeliku

Na slici 1 prikazane su anodne polarizacione krive mekog čelika u rastvoru natrijum-benzoata i uz dodatak anilina počevši od korozionog potencijala do vidljivog izdvajanja kiseonika. Anodna polarizaciona kriva u rastvoru natrijum-benzoata ima tipičan izgled pasivacione krive za metale.

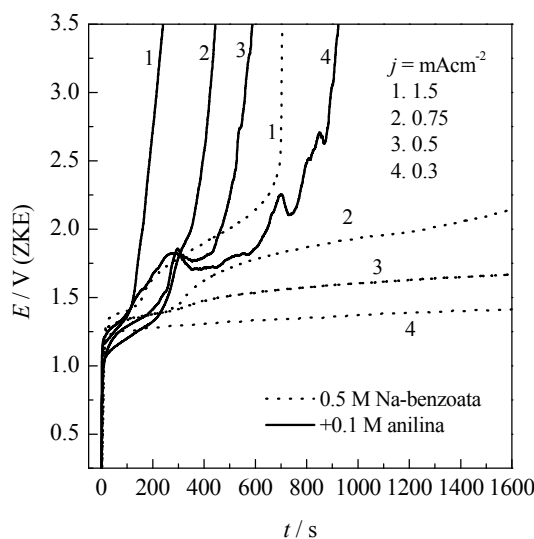


Slika 1. Anodne polarizacione krive za meki čelik u rastvoru 0,5 M natrijum-benzoata i uz dodatak 0,1 M anilina.

Figure 1. Anodic polarization curves for mild steel in 0.5 M sodium benzoate and with addition of 0.1 M aniline.

Početak pasivacije u 0,5 M rastvoru natrijum-benzoata odigrava se pri potencijalima od  $\sim -0,500$  V (ZKE). Gustina struje početka pasivacije je iznosila  $0,09$  mA  $\text{cm}^{-2}$ , dok je srednja vrednost gustine struje pasivne oblasti iznosi oko  $5$   $\mu\text{A cm}^{-2}$ . U prisustvu anilina korozioni potencijal se pomera ka pozitivnijim vrednostima za skoro  $0,7$  V. To bi moglo da ukaže da monomer anilina deluje kao inhibitor korozije u ispitivanom rastvoru. Elektropolimerizacija anilina se odigrava u oblasti potencijala od  $0,4$  do  $\sim 1,7$  V.

Na slici 2 prikazane su galvanostatske krive rastvaranja mekog čelika i elektropolimerizacije anilina pri različitim gustinama struja taloženja.



Slika 2. Galvanostatske krive mekog čelika u rastvoru 0,5 M natrijum-benzoata (tačkaste linije) i u rastvoru 0,5 M natrijum-benzoata i 0,1 M anilina (pune linije) pri različitim gustinama struja.

Figure 2. Galvanostatic curve of the mild steel in 0.5 M sodium benzoate (dotted line) and in 0.5 M sodium benzoate and 0.1 M aniline (full line) for different current densities.

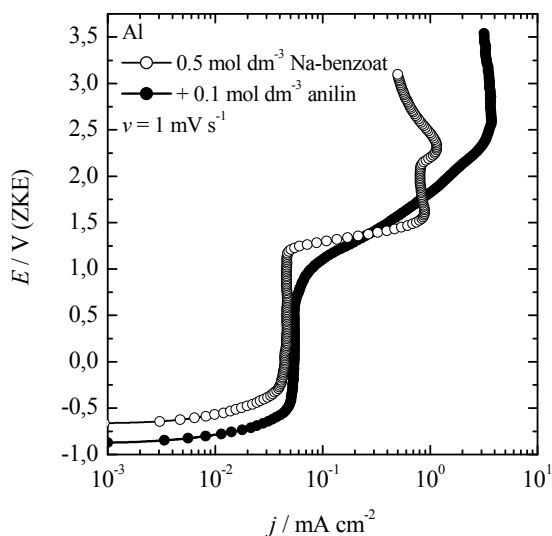
Sa slike se može videti da ne postoji indukcionni period, odnosno da ne dolazi do rastvaranja gvožđa pre polimerizacije anilina. Za razliku od taloženja polipirola iz oksalatnih rastvora [1–3] gde ne dolazi do porasta potencijala tokom vremena, iz rastvora na bazi Na-benzoata i anilina potencijal formiranja polianilina je znatno viši i iznosi u početnom periodu oko  $1,2$  V. Nakon početnog perioda dolazi do blagog povećanja potencijala što je praćeno prekrivanjem slobodne površine mekog čelika prevlakom polianilina. Nakon što je celokupna površina prekrivena prevlakom polianilina, što je ustanovljeno vizualnim posmatranjem, dolazi do naglog porasta potencijala i do vidljivog izdvajanja kiseonika. Ovo je verovatno posledica male provodljivosti formiranog filma gvožđe-benzoat-polianilin i znatnog usporavanja dalje polimerizacije anilina na već formiranom filmu. Da bi se izbegla visoka preoksidacija filma svi uzorci predviđeni za koroziona ispitivanja su taloženi sa gustinom struje od  $1,5$  mA  $\text{cm}^{-2}$  do potencijala od  $3$  V.

#### Sinteza polianilina na aluminijumu

Na slici 3 prikazane su anodne polarizacione krive aluminijuma u 0,5 M natrijum-benzoata i uz dodatak 0,1 M anilina.

Korozioni potencijal bez anilina je iznosio  $-0,66$  V, a pri dodatku anilina, za razliku od mekog čelika, negativirao se za  $\sim 200$  mV ( $-0,87$  V). U osnovnom rastvoru natrijum-benzoata nije primećena tipična pasiva-

ciona kriva za metale. Pri potencijalima između  $-0,3$  do  $1,3$  V opažen je plato sa vrednošću gustine struje od oko  $40 \mu\text{A cm}^{-2}$  koji se može pripisati formiranju poroznog hidratisanog filma aluminijum-oksida. Pri višim potencijalima od  $1,3$  V opažaju se još dva platoa sa gustinama struje od  $\sim 80 \mu\text{A cm}^{-2}$ , koji su verovatno posledica transformacija u hidratisanom oksidnom sloju. Pri dodatku monomera anilina, polimerizacija započinje pri potencijalu od oko  $0,7$  V, a polarizaciona kriva pokazuje karakteristike slične taloženju metala. Granična gustina struje difuzije iznosila je oko  $4 \text{ mA cm}^{-2}$ .



Slika 3. Anodne polarizacione krive aluminijuma u rastvoru  $0,5$  M natrijum-benzoata i uz dodatak  $0,1$  M anilina.  
Figure 3. Anodic polarization curves of aluminum in  $0,5$  M sodium benzoate and with addition of  $0,1$  M aniline.

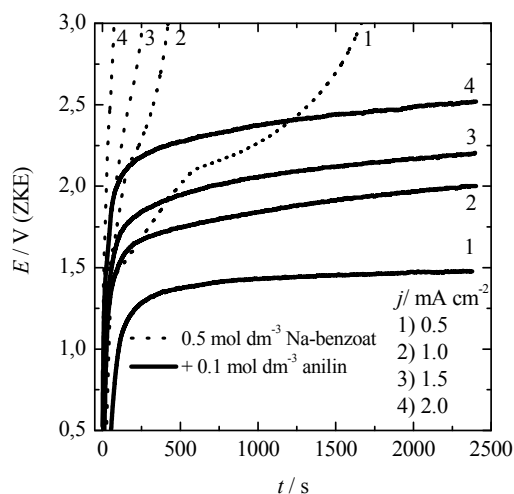
Na slici 4 prikazane su galvanostatske krive oksidacije aluminijuma u natrijum-benzoatu i uz dodatak anilina. Kao što se sa slike može videti u odsustvu anilina, visoki potencijali se veoma brzo dostižu pri bilo kojoj primenjenoj gustini struje. Krive su okarakterisane sa nekoliko prevojnih tačaka, koje verovatno odgovaraju transformaciji hidratisanih oksida i na višim potencijalima izdvajanju kiseonika. Dodatkom monomera anilina, galvanostatske krive polimerizacije ukazuju da dolazi do sinteze polianilina, ali konstantni nagib tokom produžene oksidacije takođe ukazuje da se verovatno simultano odigrava i oksidacija aluminijuma. Za dalja ispitivanja korišćeni su uzorci dobijeni pri gustinama struja od  $1,5 \text{ mA cm}^{-2}$ .

#### Sinteza polianilina na bakru

Na slici 5 prikazane su anodne polarizacione krive bakra u  $0,5$  M natrijum-benzoata i uz dodatak  $0,1$  M anilina.

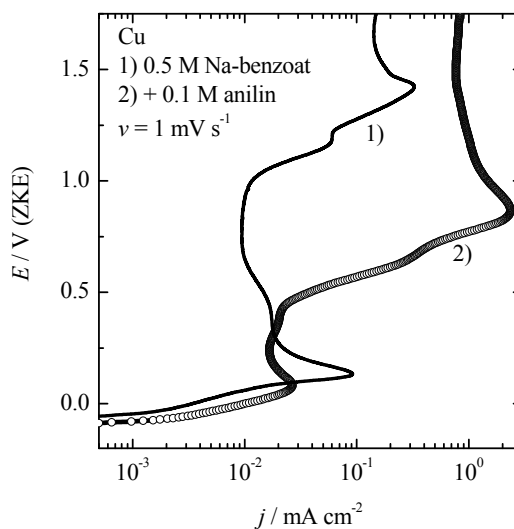
Anodna polarizaciona kriva u rastvoru natrijum-benzoata ima tipičan izgled pasivacione krive za metale. Korozioni potencijal je iznosio  $-0,06$  V, a početak

pasivacije se odigrava pri potencijalima od  $\sim 0,14$  V. Gustina struje početka pasivacije je iznosila  $100 \mu\text{A cm}^{-2}$ , dok je srednja vrednost gustine struje pasivne oblasti iznosi oko  $10 \mu\text{A cm}^{-2}$ . Pri potencijalima višim od  $1$  V uočava se transpasivna oblast, usled verovatne transformacije površinskog filma bakra i izdvajanja kiseonika. U prisustvu anilina korozioni potencijal se vrlo malo pomera ka negativnijim vrednostima. Elektropolimerizaciji anilina koja se odigrava u oblasti potencijala od  $0,25$  do  $1,25$  V, verovatno predhodi formiranje slabo rastvornog bakar-benzoata pri potencijalima nižim od  $0,25$  V.



Slika 4. Galvanostatske krive aluminijuma u rastvoru  $0,5$  M natrijum-benzoata (tačkaste linije) i u rastvoru  $0,5$  M natrijum-benzoata i  $0,1$  M anilina (deblje linije) pri različitim gustinama struja.

Figure 4. Galvanostatic curve of the aluminium in  $0,5$  M sodium benzoate (dotted line) and in  $0,5$  M sodium benzoate and  $0,1$  M aniline (thicker line) for different current densities.

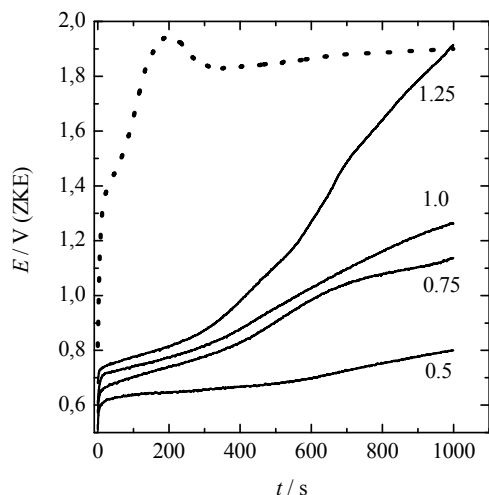


Slika 5. Anodne polarizacione krive bakra u rastvoru  $0,5$  M natrijum-benzoata i uz dodatak  $0,1$  M anilina.

Figure 5. Anodic polarization curves of copper in  $0,5$  M sodium benzoate and with addition of  $0,1$  M aniline.

Na slici 6 prikazane su galvanostatske krive oksidacije bakra u natrijum-benzoatu i uz dodatak anilina.

Kao što se sa slike može videti, u odsustvu anilina visoki potencijal se veoma brzo dostiže i pri veoma niskoj gustini struje ( $0,5 \text{ mA cm}^{-2}$ ). Krive elektropolimerizacije anilina su okarakterisane sa nekoliko prevojnih tačaka, koje se verovatno mogu pripisati transformacijama različitih stanja polianilina. Za dalja ispitivanja korišćeni su uzorci dobijeni pri gustinama struja od  $1,0 \text{ mA cm}^{-2}$ , s obzirom da pri višim gustinama struje dolazi do znatnog porasta potencijala i izdvajanja kiseonika.



Slika 6. Galvanostatska kriva bakra u rastvoru  $0,5 \text{ M}$  natrijum-benzoata pri gustini struje od  $0,5 \text{ mA cm}^{-2}$  (tačkasta linija) i elektropolimerizacije anilina na bakru iz rastvora  $0,5 \text{ M}$  natrijum-benzoata i  $0,1 \text{ M}$  anilina pri različitim gustinama struja ( $\text{mA cm}^{-2}$ ) označenim na slici.

Figure 6. Galvanostatic curve of the copper in  $0,5 \text{ M}$  sodium benzoate at current density of  $0,5 \text{ mA cm}^{-2}$  (dotted line) and in  $0,5 \text{ M}$  sodium benzoate and  $0,1 \text{ M}$  aniline for different current densities marked on the figure.

### Karakteristike polianilinskog filma na ispitivanim metalima

Na svim metalima dobijene su prevlake polianilina crne boje. Metodom savijanja je ustanovljeno da su prevlake adherentne pošto pri pucanju osnovnog metala nije došlo do odvajanja prevlake od osnovnog metala.

Na osnovu određenog priraštaja mase po jedinici površine tokom elektropolimerizacije i uz pretpostavku da je gustina polianilina dopovanog benzoatnim anjo-

nima  $\rho \approx 1,5 \text{ g cm}^{-3}$  [12] procenjene su debljine,  $\delta$ , filмова polianilina. Teorijska debljina filma je izračunata korišćenjem jednačine [9]:

$$\delta = \frac{jt(M_m + yM_A)}{(2 + y)F\rho} \quad (3)$$

gde je  $M_m$  molarna masa anilina ( $93,13 \text{ g mol}^{-1}$ ),  $M_A$  molarna masa benzoatnog anjona ( $121,12 \text{ g mol}^{-1}$ ),  $t$  vreme elektropolimerizacije, a  $y$  procenjeni stepen dopovanja benzoatnim anjonima. S obzirom na visoke potencijale elektropolimerizacije za proračun je pretpostavljeno da se dobija perningranilin sa stepenom dopovanja od  $\sim 1$  [12]. Rezultati procenjenih eksperimentalnih i teorijskih debljina filмова polianilina sumarno su prikazani u Tabeli 1.

Poređenjem eksperimentalno dobijenih i teorijski procenjenih debljina filмова, koje odgovaraju masi polianilina, procenjeno je iskorišćenje struje elektropolimerizacije. Kod bakra i mekog čelika iskorišćenje struje  $\eta_{(j)}$  tokom elektropolimerizacije je procenjeno na oko 80%, dok je kod aluminijuma procenjeno na  $\sim 70\%$ .

### Koroziono ponašanje

S obzirom da se tanke prevlake polianilina predviđaju za upotrebu kao podslaj za taloženje katarforetskih epoksidnih prevlaka, ispitivanja korozionog ponašanja su ograničena na relativno kratki vremenski period od 10 časova.

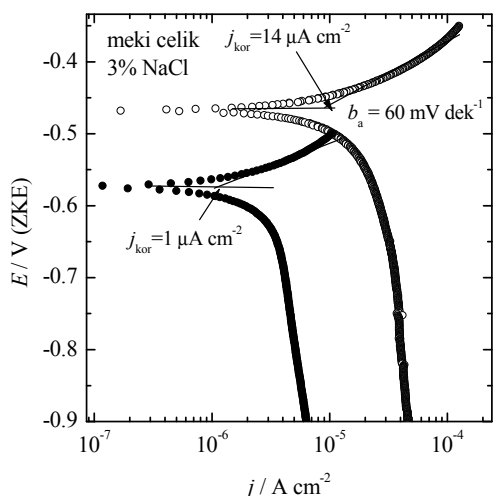
Na slikama 7–9 prikazane su uporedne polarizacione krive ispitivanih metala i metala sa prevlakom polianilina u 3% rastvoru natrijum-hlorida koji je sadržavao rastvoreni kiseonik iz vazduha. Kod svih čistih metala katodna reakcija je redukcija rastvorenog molekularnog kiseonika pod uslovima dominantne difuzione kontrole, dok je anodna reakcija aktivaciono kontrolisano rastvaranja metala. Iz preseka anodne Tafelove linije sa korozionim potencijalom određene su gustine struje korozije koje su sumarno date u tabeli 2. Na istim slikama (slike 7–9) date su i polarizacione krive ispitivanih metala sa prevlakom polianilina. Sa slika se može videti da su polarizacione krive metala sa prevlakom polianilina veoma slične polarizacionim krivama za osnovne metale posebno u anodnom delu, ali sa znatno nižim gustinama struja. S obzirom na relativno niske vrednosti korozionog potencijala (redoks potencijal za polianilin iznosi oko  $0,3 \text{ V}$ ) može se smatrati da se po-

Tabela 1. Priraštaj mase pri različitim gustinama struja elektropolimerizacije anilina, procenjena eksperimentalna i teorijska debljina filma i iskorišćenje struje elektropolimerizacije  $\eta_{(j)}$

Table 1. Increase in mass at different current densities of the aniline electropolymerization, the estimated experimental and theoretical film thickness and current efficiency of the electropolymerization  $\eta_{(j)}$

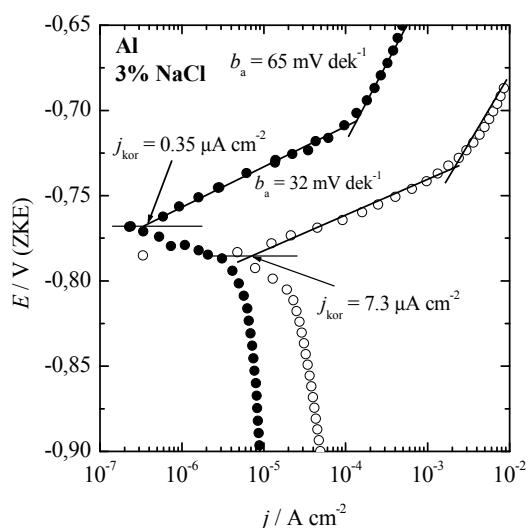
M-PANI	$j / \text{mA cm}^{-2}$	$t / \text{s}$	$m / \text{mg cm}^{-2}$	$\delta_{(\text{exp})} / \mu\text{m}$	$\delta_{(\text{teor})} / \mu\text{m}$	$\eta_{(j)} / \%$
MČ	1.50	215	0.20	0.13	0.16	81.2
Al	1.50	2400	1.8	12	17.7	70.6
Cu	1.00	1080	0.65	0.43	0.53	81.1

lianilin nalazi u delimično dedopovanom stanju, ali koji još uvek poseduje određenu provodljivost ( $\gamma > 0$ ).



Slika 7. Polarizaciona kriva za meki čelik (○) i meki čelik sa prevlakom polianilina (●) debljine 0,13 µm u 3% rastvoru NaCl.

Figure 7. Polarization curve of mild steel (○) and mild steel with polyaniline (0.13 µm) coatings (●) in 3% NaCl solution.



Slika 8. Polarizaciona kriva za aluminijum (○) i aluminijum sa prevlakom polianilina (●) debljine 12 µm u 3% rastvoru NaCl.

Figure 8. Polarization curve of aluminum (○) and aluminum with polyaniline (12 µm) coatings (●) in 3% NaCl solution.

Tabela 2. Određene vrednosti gustina struje korozije ispitivanih metala bez i sa prevlakom polianilina, izračunati stepen zaštitnog dejstva i procenjena poroznost prevlake polianilina  
Table 2. Determined corrosion current density of investigated metals without and with polyaniline coatings, calculated protection degree, and estimated porosity of polyaniline coatings

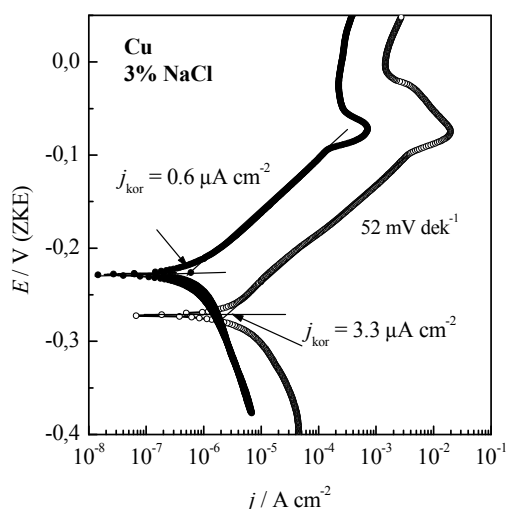
Metal	$j_{kor} / \mu A cm^{-2}$	$d(PANI) / \mu m$	$j_{kor}(PANI) / \mu A cm^{-2}$	$Z / \%$	Poroznost, %
Fe	14	0,13	1,0	92,9	7,1
Al	7,3	12	0,35	95,2	4,8
Cu	3,3	0,43	0,6	82,0	18

Na osnovu izloženih rezultata i sličnosti polarizacionih krivih korozionih reakcija, može se zaključiti da se rastvaranje metala odigrava kroz pore filma polianilina, a redukcija korozionog agensa verovatno na samoj površini filma smanjene provodljivosti. To ukazuje da polianilin u zaštiti ispitivanih metala od korozije ima prevashodno barijerni zaštitni efekat, odnosno smanjenje izložene površine metala korozionom agensu.

Na osnovu određenih vrednosti gustina struje korozije moguće je izračunati stepen zaštitnog dejstva izraženih u procentima preko sledeće jednačine:

$$Z = \left( \frac{j_{kor}^M - j_{kor}^{M(PANI)}}{j_{kor}^M} \right) \times 100 \quad (4)$$

gde su  $j_{kor}^M$  i  $j_{kor}^{M(PANI)}$  gustine struje korozije za metale i metale sa prevlakom polianilina.



Slika 9. Polarizaciona kriva za bakar (○) i bakar sa prevlakom polianilina (●) debljine 0,43 µm u 3% rastvoru NaCl.

Figure 9. Polarization curve of copper (○) and copper with polyaniline (0.43 µm) coatings (●) in 3% NaCl solution.

Stepen zaštitnog dejstva može poslužiti i za procenu poroznosti prevlaka polianilina prema jednačini:

$$\text{Poroznost} \approx 100 - Z \quad (5)$$

Sumarni rezultati određenih gustina korozije čistih metala, metala sa prevlakom polianilina, zaštitni efekat i procenjena poroznost su prikazani u Tabeli 2.

Zahvaljujući korozionoj stabilnosti filma poliani-

lina koji ne pokazuje klasične mane epoksidnog premaza (bubrenje i degradacija tokom vremena) moguće je predpostaviti ranije uočenu dugotrajnost veoma tankih filmova polianilina u zaštiti metala od korozije [9–11]. U prvim trenucima nakon kontakta sa korozionim agensom, usled relativno niskog korozionog potencijala metala, dolazi do brzog dedopovanja površine filma polianilina. S druge strane, difuziono usporeno dedopovanje zaostalih količina anjona u dubini filma polianilina i smanjenjivanje provodljivosti, može objasniti ranije primećeni porast impedanse tokom vremena kao posledice usporavanja reakcije redukcije kiseonika na slabo provodnom filmu polianilina [9–11].

## ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata može se zaključiti da se iz rastvora na bazi natrijum-benzoata i monomera anilina mogu dobiti dobro adherentni filmovi polianilina na svim ispitivanim metalima. Ispitivanjem korozionog ponašanja čistih metala i metala sa prevlakom polianilina u 3% rastvoru natrijum-hlorida, zaključeno je da do smanjenja brzine korozije metala dolazi uglavnom zbog barijernog efekta relativno poroznog filma. Kroz pore filma odigrava se anodna reakcija rastvaranja metala, a redukcija agensa korozije se verovatno odigrava na površini filma polianilina smanjene provodljivosti.

## Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnologiju Republike Srbije koje je finansiralo ovaj rad preko projekta H172046. Autor Ali Ramadan Elkais se zahvaljuje vladi Narodne Socijalističke Republike Libije koja mu je omogućila rad na doktorskim studijama.

## LITERATURA

- [1] F. Beck, R. Michaelis, F. Schloten, B. Zinger, Filmforming electropolymerization of pyrrole on iron in aqueous oxalic acid, *Electrochim. Acta* **39** (1994) 229–234.
- [2] B.N. Grgur, N.V. Krstajić, M.V. Vojnović, Č. Lačnjevac, Lj. Gajić-Krstajić, The influence of polypyrrole films on the corrosion behavior of iron in acid sulfate solutions, *Prog. Org. Coat.* **33** (1998) 1–6.
- [3] N.V. Krstajić, B.N. Grgur, S.M. Jovanović, M.V. Vojnović, Corrosion protection of mild steel by polypyrrole coatings in the acid sulfate solution, *Electrochim. Acta* **11** (1997) 1685–1691.
- [4] S. Wencheng, J.O. Iroh, Electrodeposition mechanism of polypyrrole coatings on steel substrates from aqueous oxalate solutions, *Electrochim. Acta* **46** (2000) 1–8.
- [5] F. Beck, Electrodeposition of polymer coatings, *Electrochim. Acta* **33** (1988) 839–850.
- [6] J.L. Camalet, J.C. Lacroix, S. Aeiyaach, P.C. Lacaze, Characterization of polyaniline films electrodeposited on mild steel in aqueous p-toluenesulfonic acid solution, *J. Electroanal. Chem.* **445** (1998) 117–124.
- [7] J. L. Camalet, J.C. Lacroix, S. Aeiyaach, K. Chane-Ching, P.C. Lacaze, Electrodeposition of protective polyaniline films on mild steel, *J. Electroanal. Chem.* **416** (1996) 179–182.
- [8] J. L. Camalet, J.C. Lacroix, T. Dung Nguyen, S. Aeiyaach, M.C. Pham, J. Petitjean, P.C. Lacaze, Aniline electropolymerization on platinum and mild steel from neutral aqueous media, *J. Electroanal. Chem.* **485** (2000) 13–20.
- [9] M.M. Popović, B.N. Grgur, Electrochemical synthesis and corrosion behavior of thin polyaniline-benzoate film on mild steel, *Synthetic Met.* **143** (2004) 191–195.
- [10] B.N. Grgur, M.M. Gvozdrenović, V. Mišković-Stanković, Z. Kačarević-Popović, Corrosion behavior and thermal stability of electrodeposited PANI/epoxy coating system on mild steel in sodium chloride solution, *Prog. Org. Coat.* **56** (2006) 214–219.
- [11] M.M. Popović, B.N. Grgur, V.B. Mišković-Stanković, Corrosion studies on electrochemically deposited PANI and PANI/epoxy coatings on mild steel in acid sulfate solution, *Prog. Org. Coat.* **52** (2005) 359–365.
- [12] J. Stejskal, R.G. Gilbert, Polyaniline. Preparation of a conducting polymer (IUPAC Technical Report), *Pure Appl. Chem.* **74** (2002) 857–867.

**SUMMARY****ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS AND CORROSION BEHAVIOR OF THIN POLYANILINE FILM ON MILD STEEL, COPPER AND ALUMINUM**

Ali Ramadan Elkais<sup>1</sup>, Milica M. Gvozdenović<sup>1</sup>, Branimir Z. Jugović<sup>2</sup>, Tomislav Lj. Trišović<sup>2</sup>, Miodrag M. Maksimović<sup>1</sup>, Branimir N. Grgur<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

<sup>2</sup>Institute of Technical Sciences of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

The electrochemical synthesis of polyaniline (PANI) on mild steel, aluminum and copper from the sodium benzoate solutions has been investigated. It has been shown that thin, highly adherent, polyaniline films on the investigated metals could be obtained by anodic oxidation with current densities in the range of 0.5 and 1.5 mA cm<sup>-2</sup>. The corrosion behavior of mild steel, aluminum and copper with polyaniline coating in 0.5 mol dm<sup>-3</sup> NaCl (pH 3) solutions, has been investigated by polarization technique. The corrosion current densities, porosity and protection efficiency was determined. It has been shown that polyaniline coating provided corrosion protection of all mentioned metals.

Ključne reči: Polianilin • Meki čelik  
• Bakar • Aluminijum • Korozija  
Key words: Polyaniline • Mild steel  
• Copper • Aluminum • Corrosion