

Primljen / Received: 8.1.2018.

Ispravljen / Corrected: 16.4.2018.

Prihvaćen / Accepted: 10.5.2018.

Dostupno online / Available online: 10.6.2018.

# Razvoj metode za određivanje djelotvornosti organskih inhibitora korozije armature u betonu

## Autori:



**Ivana Šoić**, mag. appl. chem  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije  
[ivana.soic@fkit.hr](mailto:ivana.soic@fkit.hr)



Prof.dr.sc. **Sanja Martinez**  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije  
[sanja.martinez@fkit.hr](mailto:sanja.martinez@fkit.hr)



**Ivana Lipošćak**, dipl.ing.građ.  
Cortec Corporation, Hrvatska  
[iliposcak@cortecvci.com](mailto:iliposcak@cortecvci.com)



**Boris Mikšić**, dipl.ing.stroj.  
Cortec Corporation, SAD  
[boris@cortecvci.com](mailto:boris@cortecvci.com)

Prethodno priopćenje

**Ivana Šoić, Sanja Martinez, Ivana Lipošćak, Boris Mikšić**

## Razvoj metode za određivanje djelotvornosti organskih inhibitora korozije armature u betonu

U radu se prvi put ispituje primjenjivost elektrokemijske impedancijske spektroskopije (EIS) u ćeliji s čeličnom pločom prekrivenom slojem betona s dodatkom klorida i inhibitora, konstruiranoj u skladu s normom HRN EN ISO 16773. Mjerenje je omogućilo kvantificiranje štetnog utjecaja klorida i zaštitne djelotvornosti inhibitora, razumijevanje mehanizma i praćenje vremenske ovisnosti inhibitorskog djelovanja, te vizualni pregled površine metala nakon mjerenja. Rezultati su usklađeni sa zamišljenom fizikalnom slikom i upućuju na primjenjivost metode.

### Ključne riječi:

korozija, armatura, beton, EIS, migrirajući inhibitor, kloridi, djelotvornost

Preliminary note

**Ivana Šoić, Sanja Martinez, Ivana Lipošćak, Boris Mikšić**

## Development of method for assessing efficiency of organic corrosion inhibitors in concrete reinforcement

The applicability of electrochemical impedance spectroscopy in a cell consisting of a steel plate covered with concrete layer containing chlorides and inhibitor, constructed in accordance with HRN EN ISO 16773, is studied for the first time in this paper. The measurements have enabled quantification of harmful chloride action and inhibitor efficiency, understanding the mechanism and time dependence of inhibitory activity, and visual inspection of metal surface after measurement. The results are consistent with the presumed physical model and point to the applicability of the method.

### Key words:

corrosion, reinforcement, concrete, EIS, migrating inhibitor, chlorides, efficiency

Vorherige Mitteilung

**Ivana Šoić, Sanja Martinez, Ivana Lipošćak, Boris Mikšić**

## Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Wirksamkeit von organischen Korrosionshemmstoffen für Betonbewehrung

In der Abhandlung untersucht man zum ersten Mal die Anwendbarkeit der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) in einer Zelle mit einer Stahlplatte, die mit einer Betonschicht mit Zusatz von Chlorid und einem Hemmstoff bedeckt ist, konstruiert in Übereinstimmung mit der Norm HRN EN ISO 16773. Die Messung ermöglichte die Quantifizierung des schädlichen Einflusses von Chlorid und der schützenden Wirksamkeit des Hemmstoffs, das Verständnis des Mechanismus und die Überwachung der zeitlichen Abhängigkeit der Wirksamkeit des Hemmstoffs sowie eine visuelle Überprüfung der Metalloberfläche nach der Messung. Die Ergebnisse stimmen mit dem erdachten physikalischen Bild überein und weisen auf die Anwendbarkeit der Methode hin.

### Schlüsselwörter:

Korrosion, Bewehrung, Beton, EIS, Migrationsinhibitor, Chloride, Wirksamkeit

## 1. Uvod

Korozija čelika za armiranje najčešći je uzrok prijevremenog propadanja i skraćivanja uporabnog trajanja armiranobetonskih konstrukcija [1]. U normalnim uvjetima uporabe beton nije agresivan korozijski okoliš za čelik. Korozija čelika u betonu javlja se ako beton nije prikladne kvalitete, ako konstrukcija nije ispravno oblikovana za izlaganje agresivnim uvjetima, ako je okolina agresivnija od one predviđene projektom ili ako se promijenila tijekom trajanja konstrukcije.

Ugrađeni čelik je u novim betonskim konstrukcijama potpuno zaštićen; pH porne vode visok je i samo je mala količina klorida u betonu ako upotrijebljeni materijali nisu kontaminirani kloridima [2]. Prema normi HRN EN 206:2016 [3], maksimalna dopuštena količina klorida je 0,4 % u odnosu na masu cementa. Bez obzira na polazno stanje, nakon određenog vremena uvjeti u betonu mogu postati pogodni za nastanak korozije. Fizička barijera zaštitnog sloja betona nije savršena zbog njegove porozne strukture i postojećih mikropukotina koje dopuštaju prodor agresivnih tvari koji zatim uzrokuju propadanje pasivnog sloja na armaturi [4].

Volumen korozijskih proizvoda je četiri do šest puta veći od volumena čelika od kojeg su proizvodi nastali. To povećanje volumena uzrokuje vlačna naprezanja u betonu i kada ta naprezanja nadmaše dopuštenu vlačnu čvrstoću betona, zaštitni sloj se ošteti pucanjem, mrvljenjem ili odlamanjem. Osim gubitka zaštitnog sloja, armiranobetonska konstrukcija može se oštetiti uslijed smanjenja poprečnog presjeka čelika i gubitka veze između betona i čelika. Kloridima uzrokovana korozija čelika za armiranje glavni je uzrok korozije u betonu širom svijeta, te iziskuje velika ulaganja u održavanje ili obnovu [1, 5].

Inhibitori korozije se godinama uspješno koriste u naftnoj i procesnoj industriji [6]. Njihova upotreba kao dodataka betonu je manje proširena, iako inhibitori korozije čine jednu od najdjelotvornijih i najjednostavnijih metoda za kontrolu korozije u armiranobetonskim konstrukcijama. Za razliku od tehnika koje su usmjerene na sprječavanje prodiranja agresivnih tvari u beton ili na odvajanje armature od korozivnog okoliša prilikom izgradnje konstrukcije, inhibitori mogu pružiti zaštitu od korozije i na novim i na postojećim konstrukcijama, kada su agresivne tvari već prisutne ili čak kada je korozijski proces već započeo. Primjena inhibitora korozije u betonu je predviđena normom HRN EN 1504-9 [7], kao metoda zaštite br. 11.3. Među zaštitnim tehnikama u navedenoj normi, inhibitori se ističu kao metoda zaštite zato što utječu izravno na korozijski proces [2]. Norma predviđa dva načina primjene inhibitora, umiješavanjem u beton ili naknadnom primjenom na površini betona. Naknadnu primjenu omogućuju migrirajući inhibitori korozije (MCI®) bazirani na aminotehnologiji (aminoalkoholi i aminokarboksilati), koji se unutar betona kreću pomoću kapilarnih sila i migriraju kroz strukturu pora betona do površine metala [8, 9]. Ostali dijelovi norme HRN EN 1504 daju opis i prihvatljive vrijednosti svojstava specifičnih proizvoda i sustava za zaštitu i popravak betonskih

konstrukcija. Norma HRN EN 1504-9 eksplicitno navodi da ne postoji odgovarajuća norma navedenog niza, koja se odnosi na primjenu inhibitora za beton, pa treba odrediti djelotvornost inhibitora prije specificiranja njegove primjene. Stoga je iznimno važan razvoj pouzdane metode za ispitivanje inhibitorске djelotvornosti u betonu.

Projektiranje i planiranje održavanja i obnavljanja betonskih konstrukcija zahtijevaju kontrolu kvalitete, odnosno pouzdane tehnike pomoću kojih se može odrediti djelotvornost i neškodljivost predviđenih mjera zaštite betona od degradacije [5]. Jedina do sada normirana metoda koja se primjenjuje za ispitivanje djelotvornosti inhibitora korozije u betonu ASTM-G109 [10] zasniva se na mjerenju potencijala armature i struje korozijskih makročlanaka, te zahtijeva dugotrajno vrijeme izlaganja i ne daje brojčanu vrijednost inhibitorске djelotvornosti. U ovom radu prvi su put za ocjenu djelotvornosti inhibitora korozije u betonu primijenjene konstrukcija elektrokemijske čelije i metoda elektrokemijske impedancijske spektroskopije (EIS), opisane nizom normi HRN EN ISO 16773-1 do 4 [11-14]. Te su norme, izdane 2016. i 2017. godine, originalno razvijene za mjerenje zaštitnih svojstava organskih premaza visoke otpornosti ( $>10^9 \Omega \text{cm}^2$ ), ali je područje njihove primjene u najnovijem izdanju iz 2016. prošireno na uzorke s prevlakama manjih otpornosti te na nezaštićene metalne uzorke. Među prednostima EIS metode važno je istaknuti korištenje izmjeničnog naponskog signala vrlo male amplitude koji izaziva protok malih struja ne uništavajući pritom ispitivanu metalnu površinu, te mogućnost karakterizacije električnih svojstava i površine metala kao i sloja betona na toj površini [15]. Budući da metoda EIS nije destruktivna, mjerenja je moguće ponavljati tijekom vremena, te pratiti korozijsko ponašanje čelika izazvano korozijskim svojstvima samog betona, prodorom agresivnih tvari u beton, kao i umiješavanjem ili migracijom inhibitora korozije u beton. Na taj je način moguće simulirati različite situacije koje se javljaju u praksi i znatno smanjiti vrijeme eksperimenta.

U ovom radu ispitivana je djelotvornost triju vrste organskih inhibitora korozije umiješanih u beton zajedno s kloridima. Cilj je rada razviti novu metodu kojom će se moći dokazati djelotvornost inhibitora korozije te pomoći razumijevanju inhibicije korozije armature kroz vremensko praćenje promjena unutar samog betona i na granici faza čelik-beton izazvanih primjenom inhibitora.

## 2. Eksperimentalni dio

Uzorci su pripremani korištenjem Q-PANEL uzoraka od ugljičnog čelika veličine 0,02 x 2 x 3,5" koji su služili kao radna elektroda i simulirali armaturu unutar betona. Stakleni cilindri fiksirani su na površinu čelika pomoću Poly Max® Original Express, univerzalnog vodootpornog ljepila, te su poslužili kao kalupi za pripremljeni mort. Fotografija i shematski prikaz čelije nalaze se na slikama 1.a i 1.b.

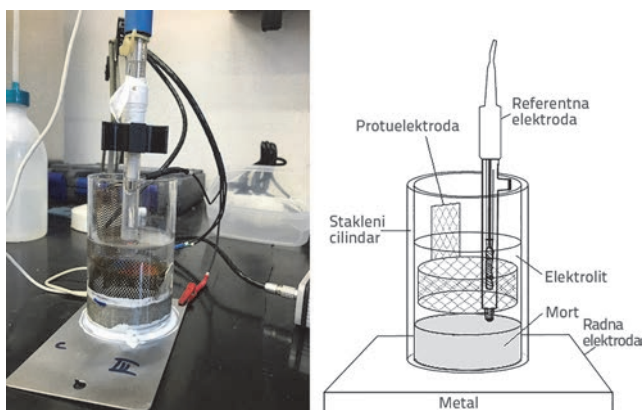
Mort je pripremljan prema normi HRN EN 196-3:2009 - postupak 2 [16], upotrebom portland cementa, agregata veličine do 4

Tablica 1. Sastav uzoraka

Uzorak	Voda	Pijesak	Cement	1 % klorida	Inhibitor
C	+	+	+	-	-
C+NaCl	+	+	+	+	-
INH A	+	+	+	+	+
INH B	+	+	+	+	+
INH C	+	+	+	+	+

mm i vode iz vodovoda. Pripravljana su po tri uzorka od svakog sastava (tablica 1.).

Korišteni inhibitori su organski migrirajući inhibitori korozije, u daljnjem tekstu označeni kao INH A, B i C, koji sadrže kombinaciju aminoalkoholnih soli karboksilnih kiselina na bazi vode i kojima je osnovna svrha zaštita betonskog čelika od korozije [8]. Umiješani u beton, migriraju prema armaturi gdje na površini metala formiraju monomolekularni sloj koji inhibira reakciju korozije i na anodnim i na katodnim površinama korozijskih članaka. Ispitivani inhibitori su neškodljivi za okoliš i ne zahtijevaju sigurnosne mjere rukovanja. Zbog svojih svojstava, inhibitor INH C može uzrokovati produljenje vremena očvršćivanja betona, dok inhibitori INH A i INH B ne utječu na vrijeme očvršćivanja, te se često koriste kod reparativnog morta. Uzorci morta pripravljani su u omjeru voda/cement 0,5. Veći omjer voda/cement služi za pripremu visokoporoznog morta kako bi se osiguralo da korozija započne u vremenu u kojem se provodi eksperiment, a još važnije, kako bi se odredilo štite li zaštitna sredstva zaista štite u onim dijelovima konstrukcije u kojima je nehotice prisutan tako veliki omjer vode/cementa. Mort se upotrebljava umjesto betona jer površina ispitivanog čelika nije dovoljna da bi omogućila frakciju agregata veću od 4 mm [17]. Nakon pripreme, njegovanje uzoraka je trajalo 7 dana. Potom su Poly Max® Original Express masom zabrtvljeni rubovi između morta i stakla kako bi se izbjegle pogreške zbog prodora elektrolita između dva materijala. Uzorci su odstajali dodatnih 7 dana, nakon čega je u svaku ćeliju dodano 100 mL zasićenog kalcijevog hidroksida s dodatkom 1 % NaCl. Uzorci su pokriveni prozirnom folijom kako bi se spriječilo isparavanje elektrolita u vremenu između mjerenja. Mjerenje se provodilo tijekom 76 dana i to nakon 6, 23, 33, 54 i 76 dana.



Slika 1. Fotografija i shematski prikaz elektrokemijske mjerne ćelije

## 2.1. Elektrokemijska mjerenja

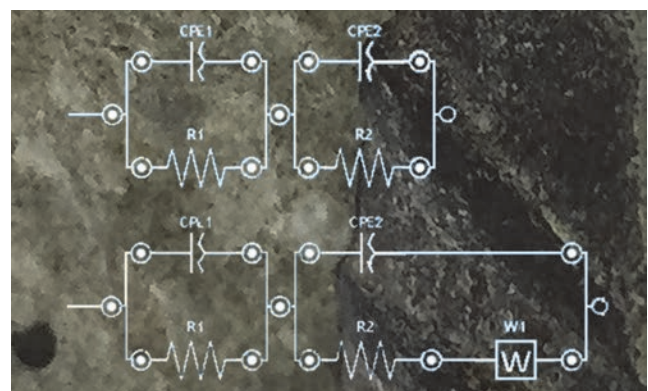
Mjerenja elektrokemijske impedancijske spektroskopije provodila su se pomoću troelektrodnog sustava koji je obuhvaćao prethodno opisanu radnu elektrodu, mrežicu od nehrđajućeg čelika kao protuelektrodu, te SCHOTT B3510+ kalomel referentnu elektrodu, koristeći uređaj PalmSens 3 sa softverom PSTrace. Elektrolit je bila zasićena otopina kalcijevog hidroksida s 1 % natrijeva klorida.

Korozijski potencijal se očitavao neposredno prije EIS mjerenja. Amplituda izmjeničnog naponskog signala kod EIS metode je bila 0,05 V, a frekvencija od 10 mHz do 50 kHz.

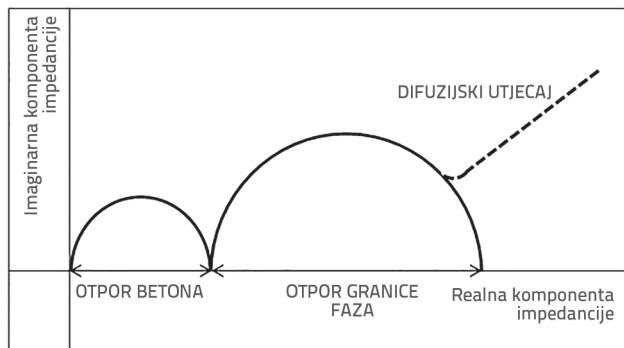
## 3. Rezultati i rasprava

### 3.1. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija

Svi impedancijski spektri interpretirani su pomoću ekvivalentnih krugova na slici 2., koji se smatraju pogodnim za armaturu u betonu i mortu [17]. Predloženi ekvivalentni električni krug sastoji se od dva serijski spojena kruga koji se sastoje od stalnog faznog elementa (CPE) i otpornika (R) u paralelnom spoju. Prvi, visokofrekvencijski paralelni krug se može pripisati dielektričnim svojstvima betona [18], a drugi, niskofrekvencijski paralelni krug pripisuje se granici faza između betona i čelika. Dio rezultata interpretiran je s ekvivalentnim električnim krugom koji, osim već navedenog, sadrži i Warburgov element koji predstavlja difuzijski utjecaj na reakciju redukcije kisika koja se odvija dovoljnom brzinom da bude pod difuzijskom kontrolom, što upućuje na aktivnu koroziju [19].



Slika 2. Električni ekvivalentni krugovi korišteni za impedancijska mjerenja



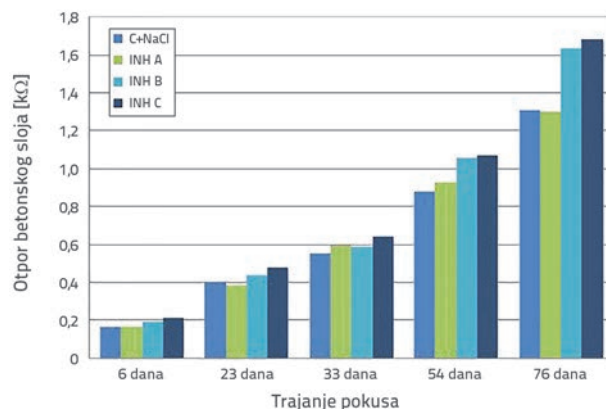
Slika 3. Shematski prikaz impedancijskog spektra u kompleksnoj ravnini

U slučaju gornjeg ekvivalentnog kruga prikazanog na slici 2., impedancijski graf u kompleksnoj ravnini (puna crta na slici 3.) poprima oblik dva polukruga, u visokofrekvencijskom i niskofrekvencijskom području. U slučaju donjeg ekvivalentnog kruga prikazanog na slici 2., drugi polukrug završava skretanjem i pravocrtnim rastom impedancije pri niskim frekvencijama (isprekidana crta na slici 3.).

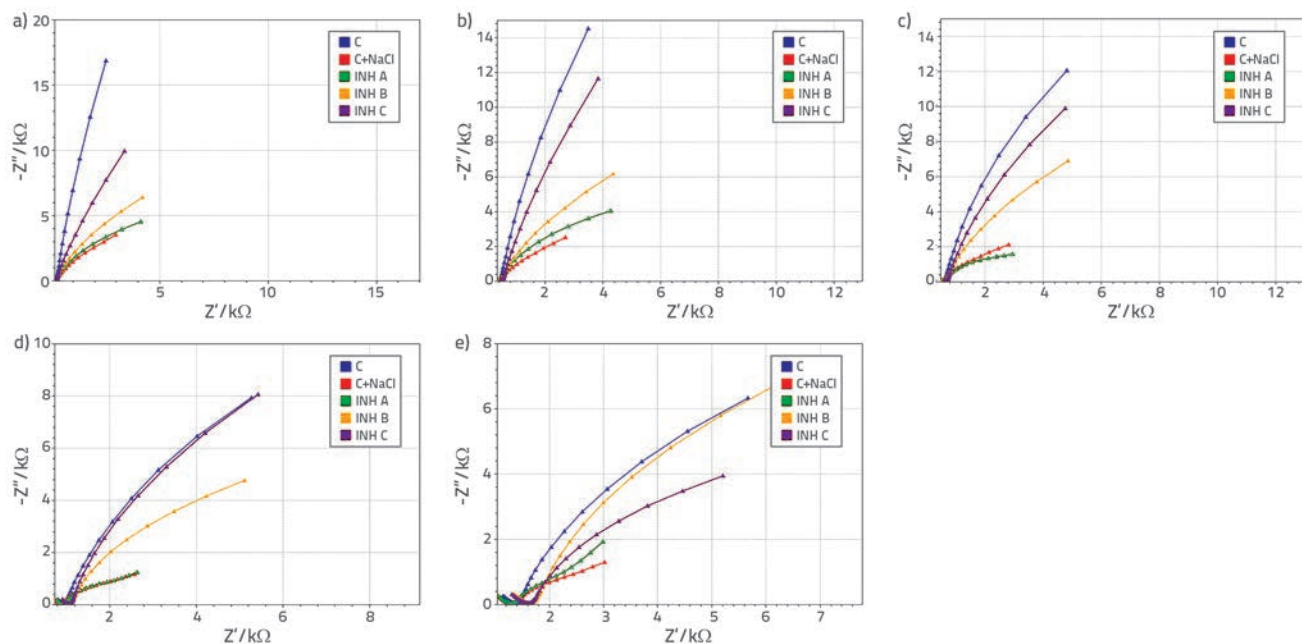
Promjer niskofrekvencijskog impedancijskog polukruga, koji se dobiva na temelju modela ekvivalentnih krugova, upućuje na otpor koroziji granice faza čelik/beton [19]. Promjer visokofrekvencijskog impedancijskog polukruga upućuje na otpor betonskog sloja. Na slikama 4.a do 4.e koje prikazuju rezultate mjerenja, vide se samo dijelovi polukrugova, a parametri modela dobivaju se prilagodbom modela podacima mjerenja. Iz impedancijskih spektara prikazanih na slici 4. očito je da najveću impedanciju granice faza ima uzorak bez dodataka (C), a najmanju uzorak s NaCl bez inhibitora (C+NaCl). Srednje impedancije zamjećuju se kod uzoraka s INH C i INH B, dok od inhibiranih uzoraka, najmanje vrijednosti impedancije ima

uzorak s inhibitorom INH A. Impedancija svih uzoraka mijenja se u vremenu. Uzorci s INH B i INH C tijekom cjelokupnog ispitivanja zadržavaju relativno visoke vrijednosti impedancije. Uzorak s dodatkom INH B pri zadnjem mjerenju poprima impedanciju vrlo blisku onoj uzorka bez klorida. Difuzijski utjecaj dolazi do izražaja samo kod sustava bez inhibitora s kloridima kod svih vremena izlaganja i kod sustava s inhibitorom INH A i kloridima, za duža vremena izlaganja  $\geq 33$  dana. Isti uzorci imaju tijekom ispitivanja vrlo niske vrijednosti impedancije. Opisano ponašanje impedancije na granici faza čelik/beton može se vidjeti iz histograma na slikama 5. i 6.

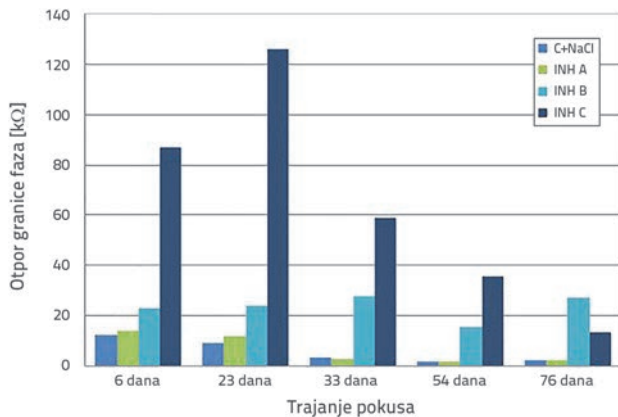
Zadržavanje visoke impedancije tijekom ispitivanja i odsutnost difuzijske kontrole korozijske reakcije upućuje na inhibiciju korozije od strane ispitivanih dodataka betonu INH B i INH C. Može se reći da dodatak djelotvornog inhibitora betonu uvelike poništava štetno djelovanje klorida.



Slika 5. Grafički prikaz promjene otpora betonskog zaštitnog sloja ovisno o trajanju pokusa

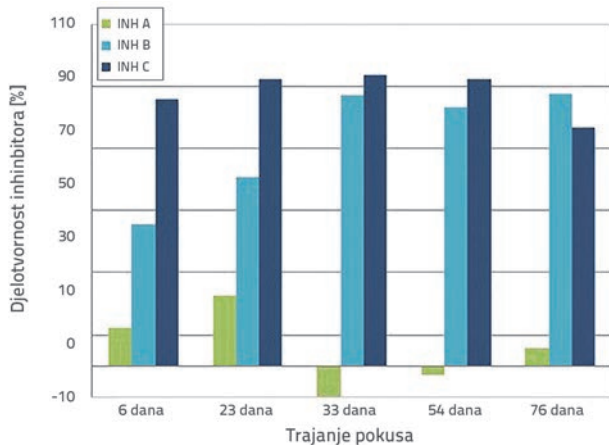


Slika 4. Niquestovi prikazi za različite sustave nakon: a) 6 dana; b) 23 dana; c) 33 dana; d) 54 dana; e) 76 dana

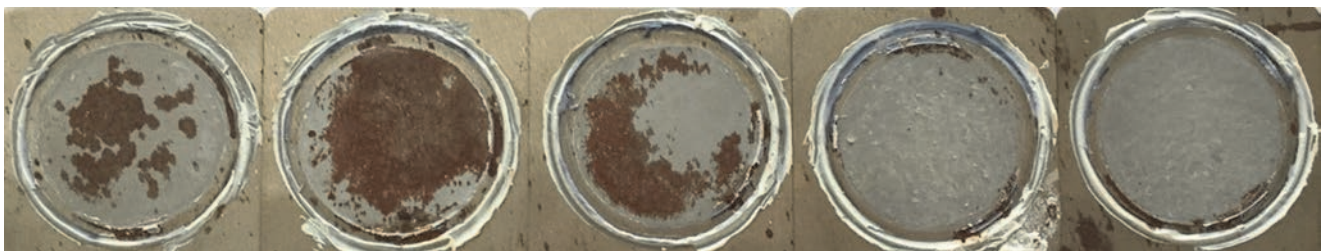


Slika 6. Grafički prikaz promjene otpora na granici faza ovisno o trajanju pokusa

Histogram na slici 5. pokazuje promjenu otpora betonskog zaštitnog sloja koji se povećava s vremenom. Vrijednosti otpora betonskog sloja uzoraka su bliske, no zadnje mjerenje pokazuje izrazito povišenje otpora za uzorke s inhibitorima INH B i INH C. Usporedbom histograma na slici 5., koji prikazuje otpor betonskog sloja, i histograma na slici 6. koji prikazuje otpor granice faza čelik/beton, vidi se da ukupnim otporom dominira otpor granice faza, te se stoga može uzeti da taj otpor odražava i djelovanje inhibitora [19-21]. Sustavi s dodatkom INH B i INH C pokazuju izrazito visok otpor granice faza čelik/beton koji je znatno viši od otpora kontrolnog uzorka bez inhibitora, a s dodatkom klorida.



Slika 7. Grafički prikaz djelotvornosti korištenih inhibitora u vremenu od dodatka elektrolita



Slika 8. Tipičan izgled čeličnih pločica nakon uklanjanja cilindara s betonom i izlaganja korozivnom okolišu. Redom su slijeva nadesno prikazani pojedini uzorci: bez klorida, s kloridima te s kloridima i inhibitorom A, B i C

Valja naglasiti da uzorak bez inhibitora i klorida, čiji otpori nisu prikazani na slikama, ima vrlo visok početni otpor granice faza od 506200 Ω koji se tijekom eksperimenta znatno smanji, na 22690 Ω. S druge strane, otpor betonskog sloja uzorka bez inhibitora i klorida usporediv je s onim ostalih uzoraka i raste tijekom eksperimenta, sa 165 na 1428 Ω. Ovakvo ponašanje komponenti impedancije upućuje na ispravnost interpretacije modela ekvivalentnih krugova. Djelotvornost inhibitora izračunana je prema jednadžbi (1):

$$\eta [\%] = \frac{R_0^{-1} - R_{INH}^{-1}}{R_0^{-1}} \times 100 \quad (1)$$

gdje je otpor granice faza čelik/beton u sustavu bez inhibitora označen s  $R_0$ , a u sustavu s inhibitorom s  $R_{INH}$ . Iz histograma koji sadrži izračunane djelotvornosti sustava s inhibitorima (slika 7.) vidi se da su inhibitori INH B i INH C vrlo djelotvorni u sprječavanju korozije čelične podloge, te da se ta njihova djelotvornost s prolaskom vremena ustaljuje. Djelotvornost INH A, za razliku one INH B i C, oscilira oko nule. Oscilacije se mogu objasniti pasivacijom i depasivacijom dijelova površine, što je karakteristično za ponašanje čelične površine u djelomično pasivirajućem okolišu. Vrijednost djelotvornosti usrednjena tijekom cijelog perioda ispitivanja iznosi 90,9% za INH C, 70,9% za INH B i 5,6% za INH A. Vidi se da se relativno stabilne vrijednosti za visoko djelotvorne inhibitore B i C postižu već nakon 33 dana, što omogućuje skraćivanje vremena provedbe eksperimenta. To je vrijeme mnogo kraće od onoga koje je uobičajeno potrebno za provedbu metode ASTM-G109.

### 3.2. Izgled uzoraka nakon mjerenja

Neposredno nakon završetka mjerenja, površina čelika prekrivena je bijelo-sivim slojem koji odražava pasivaciju čelika, koja je rezultat kontakta s betonom u kojem se nalazi porna voda visokog pH. Na slici 8. je izgled površine metala nakon završetka mjerenja i dvotjedne izloženosti korozivnom okolišu s otprilike 50% RH.

Na djelomično pasiviranoj površini dolazi do stvaranja aktivnog korozijskog članka što potiče koroziju nezaštićenih dijelova površine. Uočava se izražena korozija na uzorku s dodatkom klorida i bez inhibitora, te nešto manja na uzorku bez dodatka inhibitora i klorida. Uzorak s dodatkom INH A

također pokazuje znakove korozije, a druga su dva uzorka ostala nepromijenjena. Vizualno se zamjećuje razlika u jednolikosti i debljini sivo-bijelog sloja na površini metala. Sloj je homogeniji i deblji kod uzoraka s inhibitorima INH B i INH C, a najlošiji je kod uzoraka bez inhibitora. Vizualni izgled uzoraka u dobroj je korelaciji s rezultatima impedancijskih mjerenja.

#### 4. Zaključak

U ovome radu istraživana je mogućnost za ispitivanje djelotvornosti inhibitora korozije armature u betonu prilagodbom normirane metode HRN EN ISO 16773, zahtijevanoj svrsi. Specifična konstrukcija mjerne ćelije omogućila je dobivanje impedancijskih spektara iz kojih je moguće zaključiti o:

- mehanizmu
- djelotvornosti
- vremenskoj ovisnosti djelovanja inhibitora
- po završetku mjerenja moguće je napraviti vizualni pregled površine metala.

Ispitana su tri organska inhibitora korozije. Na temelju istraživanja može se zaključiti da je migrirajući inhibitor INH C najdjelotvorniji

u inhibiciji korozije (srednja vrijednost djelotvornosti je 90,9 %), te se njegova djelotvornost znatno ne mijenja s vremenom. INH B također ima visoku stabilnu djelotvornost srednje vrijednosti 70,9 %, a zadnje mjerenje pokazuje gotovo identično ponašanje sustava s kloridima i INH B i sustava s čistim mortom, bez dodatka natrijeva klorida. Inhibitor INH A pokazuje povećanje djelotvornosti na početku mjerenja do približno 20 %, no kasnije mu djelotvornost pada, da bi se na kraju mjerenja ponovno povećavala (srednja vrijednost djelotvornosti je 5,6 %).

Utvrđeno je da se prisutnost klorida u betonu najviše odražava na otpor granice faza betona i čelika, odnosno upravo na mjestu gdje djeluje korozijski inhibitor. Brzina ispitivanja kao i mogućnost kvantifikacije inhibitorске djelotvornosti, glavne su prednosti ispitivane metode pred uvriježenom metodom ASTM-G109, koja najvjerojatnije zbog svoje sporosti i svoje kvalitativne prirode nije pronašla mjesto u europskoj normizacijskoj praksi.

#### Zahvala

Autori zahvaljuju doc. dr. sc. Marijani Serdar i Građevinskom fakultetu koji su svojim savjetima i pomoći pridonijeli izradi ovog rada.

#### LITERATURA

- [1] Yoon-Seok, C., Jung-Gu, K., Kwang-Myong, L.: Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete, *Corrosion Science*, 48 (2006), pp. 1733-1745, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.019>
- [2] Böhm, H.: Corrosion in reinforced concrete structures, 1<sup>st</sup> edition, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2005, <https://doi.org/10.1533/9781845690434>
- [3] HRN EN 206:2016 Beton - Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206:2013+A1:2016)
- [4] Youping, L.: Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, dissertation, pp. 1, 7, 12, 1996.
- [5] Ukrainczyk, N.: Predviđanje korozije armature u betonu pri maritimnim uvjetima pomoću živčevne mreže, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, diplomski rad, Zagreb, 2004.
- [6] Hansson, C.M., Mammoliti, L., Hope, B.B.: Corrosion inhibitors in concrete - Part I: The principles, *Cement and Concrete Research*, 28 (1998) 12, pp. 1775-1781, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00142-2)
- [7] HRN EN 1504-9 Proizvodi i sustavi za zaštitu i popravak betonskih konstrukcija - Definicije, zahtjevi, kontrola kvalitete i vrednovanje sukladnosti - 9. dio: Opća načela za uporabu proizvoda i sustava (EN 1504-9:2008)
- [8] Cortec Corporation, <https://www.cortecvci.com/Publications/Brochures/MCIBrochure/MCI.pdf> pristup 19.09.2017.
- [9] Miksic, B.A.: Improving Durability of Infrastructure with Migratory Corrosion Inhibitors (MCI<sup>®</sup>), FNACE, handbook, 2014.
- [10] ASTM G109 - 07(2013) Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments
- [11] HRN EN ISO 16773:2016 Elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS) na visokootpornim prevučenim uzorcima - 1. dio: Nazivi i definicije (ISO 16773-1:2016; EN ISO 16773-1:2016)
- [12] HRN EN ISO 16773:2016 Elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS) na visokootpornim prevučenim uzorcima - 2. dio: Prikupljanje podataka (ISO 16773-2:2016; EN ISO 16773-2:2016)
- [13] HRN EN ISO 16773:2016 Elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS) na visokootpornim prevučenim uzorcima - 3. dio: Obrađivanje i analiza podataka iz slijepih ćelija (ISO 16773-3:2016; EN ISO 16773-3:2016)
- [14] HRN EN ISO 16773:2017 Elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS) na visokootpornim prevučenim uzorcima - 4. dio: Primjeri spektra polimerom prevučenih uzoraka (ISO 16773-4:2017; EN ISO 16773-4:2017)
- [15] Montemor, M.F., Simões, A.M.P., Salta, M.M., Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS, *Cement & Concrete Composites*, 22 (2000), pp. 175 - 185, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00003-2)
- [16] HRN EN 196-3:2016 Metode ispitivanja cementa - 3. dio: Određivanje vremena vezivanja i postojanosti volumena (EN 196-3:2016)
- [17] Trépanier, S.M., Hope, B.B., Hansson, C.M.: Corrosion inhibitors in concrete Part III. Effect on time to chloride-induced corrosion initiation and subsequent corrosion rates of steel in mortar, *Cement and Concrete Research*, 31 (2001), pp. 713-718, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00470-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00470-7)

- [18] Monticelli, C., Frignani, A., Trabanelli, G.: A study on corrosion inhibitors for concrete application, *Cement and Concrete Research*, 30 (2000), pp. 635-642, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00221-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00221-0)
- [19] Trabanelli, G., Monticelli, C., Grassi, V., Frignani, A.: Electrochemical study on inhibitors of rebar corrosion in carbonated concrete, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 1804- 1813, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.12.010>
- [20] Chaparro, W.A., Ruiz, J.H.B., Gómez, R.J.T.: Corrosion of reinforcing bars embedded in alkali-activated slag concrete subjected to chloride attack, *Materials Research*, 15 (2011) 1, <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000096>
- [21] da Silva, F.G., Liborio, J.B.L.: A study of steel bar reinforcement corrosion in concretes with SF and SRH using electrochemical impedance spectroscopy, *Materials Research*, 9 (2006) 2, <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000200018>