

Primjena nehrđajućih čelika kao armature u betonu

Marijana Serdar, Irina Stipanović Oslaković, Dubravka Bjegović

Ključne riječi

armiranobetonska konstrukcija, trajnost, troškovi održavanja, armatura, korozija, nehrđajući čelik

Key words

reinforced-concrete structure, durability, maintenance costs, reinforcement, corrosion, stainless steel

Mots clés

construction en béton-armé, durabilité, coûts d'entretien, ferrailage, corrosion, acier inoxydable

Ключевые слова

железобетонная конструкция, долговечность, расходы на обслуживание, арматура, коррозия, нержавеющая сталь

Schlüsselworte

Stahlbetonkonstruktion, Dauerhaftigkeit, Wartungskosten, Bewehrung, Korrosion, rostfreier Stahl

M. Serdar, I. Stipanović Oslaković, D. Bjegović

Izvorni znanstveni rad

Primjena nehrđajućih čelika kao armature u betonu

Polazeći od štetnosti korozije armature na trajnost i troškove održavanja armiranobetonskih konstrukcija, u radu se kao način sprečavanja korozije armature opisuje primjena armature od određenih vrsta nehrđajućih čelika koji su otporni na koroziju. Prikazani su rezultati ispitivanja koruzijske otpornosti nehrđajućih čelika i ugljičnog čelika te su dane preporuke za upotrebu nehrđajućih čelika kao armature ovisno o razredu izloženosti projektirane armiranobetonske konstrukcije.

M. Serdar, I. Stipanović Oslaković, D. Bjegović

Original scientific paper

Use of stainless steel as concrete reinforcement

Starting from the impact the steel corrosion has on the durability and maintenance costs of reinforced-concrete structures, the authors describe how steel corrosion can be prevented by using reinforcement made of certain types of stainless steel that are resistant to corrosion. Results obtained by testing corrosion resistance of stainless steel and carbon steel are presented, and recommendations are given for the use of stainless steel as reinforcement depending on exposure category of a particular reinforced structure.

M. Serdar, I. Stipanović Oslaković, D. Bjegović

Ouvrage scientifique original

L'emploi d'acier inoxydable comme armature de béton

Compte tenu de l'effet de corrosion d'acier sur la durabilité et sur le coût de l'entretien des constructions en béton armé, les auteurs décrivent comment la corrosion d'acier peut être évitée en utilisant le ferrailage fait de certains types d'acier inoxydable qui sont résistants à la corrosion. Les résultats obtenus par l'essai de résistance à la corrosion d'acier inoxydable et d'acier carbonique sont présentés, et les recommandations sont fournies sur l'emploi d'acier inoxydable comme ferrailage, et cela en fonction de la catégorie de sensibilité des constructions en béton armé.

M. Serdar, И. Ступанович Ослакович, Д. Бегович

Оригинальная научная работа

Применение нержавеющей стали в качестве арматуры для бетона

Исходя из негативного воздействия коррозии арматуры на долговечность железобетонных конструкций и расходы на их обслуживание, в работе в качестве способа предотвращения коррозии арматуры описывается применение арматуры из определенных видов нержавеющей стали, характеризующихся стойкостью к коррозии. Приведены результаты испытаний коррозионной стойкости нержавеющей и углеродистой стали, даны рекомендации по использованию нержавеющей стали в качестве арматуры в зависимости от класса экспонированности проектируемой железобетонной конструкции.

M. Serdar, I. Stipanović Oslaković, D. Bjegović

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Anwendung rostfreier Stähle als Bewehrung im Beton

Ausgehend von der Schädlichkeit der Bewehrungskorrosion für die Dauerhaftigkeit und die Wartungskosten von Stahlbetonkonstruktionen beschreibt man im Artikel als Verfahren der Verhinderung der Bewehrungskorrosion die Anwendung bestimmter Arten von rostfreien Stählen die gegen Korrosion widerstandsfähig sind. Dargestellt sind Ergebnisse der Untersuchung der Korrosionswiderstandsfähigkeit rostfreier Stähle und Kohlenstahl. Vorgelegt sind Empfehlungen für die Benützung rostfreier Stähle als Bewehrung, abhängig von der Klasse der Ausgesetzttheit der entworfenen Stahlbetonkonstruktion.

Autori: **Marijana Serdar**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Kačićeva 26, Zagreb;
dr. sc. **Irina Stipanović Oslaković**, dipl. ing. građ., Institut IGH, Rakušina 1, Zagreb;
prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

1 Uvod

Tijekom pregleda armiranobetonskih konstrukcija izloženih agresivnom okolišu, poput okoliša XC (korozija uzrokovana karbonatizacijom), XD (korozija uzrokovana solima koje nisu iz mora), XS (korozija uzrokovana kloridima iz morske vode) i XF (korozija uzrokovana zamrzavanjem i odmrzavanjem) [1] ustanovljeno je da gotovo sve konstrukcije imaju smanjenu funkcionalnost tijekom uporabnog vijeka zbog djelovanja opterećenja koja utječu na trajnost (slika 1.). Detaljnim je pregledom



Slika 1. Korozijska oštećenja: a) Maslenički most, b) Krčki most, c) Torpedo, Rijeka

korozija armature prepoznata kao jedan od glavnih uzroka smanjene trajnosti armiranobetonskih konstrukcija u agresivnom okolišu [2].

Zbog činjenice da su troškovi popravaka prijevremeno dotrajalih konstrukcija između 2-4 % bruto nacionalnog dohotka većine europskih zemalja, te često premašuju troškove izgradnje same konstrukcije, većina svjetskih istraživanja usmjerena je k pronalaženju novih tehnologija i materijala čijom bi se primjenom povećala trajnost armiranobetonskih konstrukcija.

Jedan od načina postizanja veće trajnosti armiranobetonskih konstrukcija jest uporaba određenih vrsta nehrđajućih čelika, poput čelika 1.4301 (AISI 304) i 1.4401 (AISI 316), kao zamjena za armaturu u betonu, zbog njihove otpornosti na koroziju u betonu, čak i kada je u okolišu prisutna velika koncentracija klorida [3]. Zbog velike količine legirajućih elemenata, poput kroma i nikla, u tim vrstama nehrđajućih čelika, a samim time i visoke cijene takvih materijala, primjena visokolegiranih čelika kao armature u betonu rijetko je ekonomski opravdana. Rezultati nedavnih svjetskih ispitivanja dokazala su da su neki niskolegirani čelici otporniji na koroziju od ugljičnog čelika, dok im je cijena znatno niža pa time postaju ekonomski opravdani [4-6].

U ovom su radu opisana inženjerska svojstva korozijski otpornih čelika presudna za razmatranje upotrebe tih materijala kao armature u betonu i prikazan je dio rezul-

tata korozijskih ispitivanja ovih vrsta čelika u pomnoj vodi betona. Cilj ovog istraživanja jest ispitati ponašanje različitih vrsta legiranih čelika u pomnoj vodi većeg i manjeg alkaliniteta, s različitim koncentracijama klorida, a sve u svrhu simuliranja betona izloženog agresivnom okolišu kao što su kloridi i/ili karbonatizacija. Korozijska otpornost i ekonomska prihvatljivost pojedinih legiranih čelika uspoređeni su s uobičajeno upotrebljivanim armaturnim čelikom (ugljični čelik) te s visokolegiranim nehrđajućim čelicima.

2 Vrste čelika za armiranje

2.1 Ugljični čelik

Čelik je uobičajen naziv za čitav niz željeznih legura. U građevinarstvu se za potrebe armiranja betona najčešće upotrebljava ugljični čelik. Osim ugljičnog čelika, legure željeza se ovisno o količini legirajućih elemenata dijele na: niskolegirane i visokolegirane čelike.

Kemijski sastav čelika koji se uobičajeno rabi kao armatura u betonu mora zadovoljavati vrijednosti iz tablice 1. Čelik se, također, smatra zavarljivim ako nisu premašene vrijednosti prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika koji se rabi kao armatura u betonu (maseni udio u postocima) [1]

Ugljik najviše	Sumpor najviše	Fosfor najviše	Dušik najviše	Ekvivalent ugljika ¹ najviše
0,24	0,055	0,05	0,014	0,52

¹ Dopušteno je premašiti najveće vrijednosti za ugljik za 0,03 % u masi, uz uvjet da ekvivalent ugljika bude manji od 0,02 % u masi

Vrijednost ekvivalentna ugljika, C_{eq} računa se ovisno o sadržaju pojedinih kemijskih elemenata u postotku mase prema izrazu:

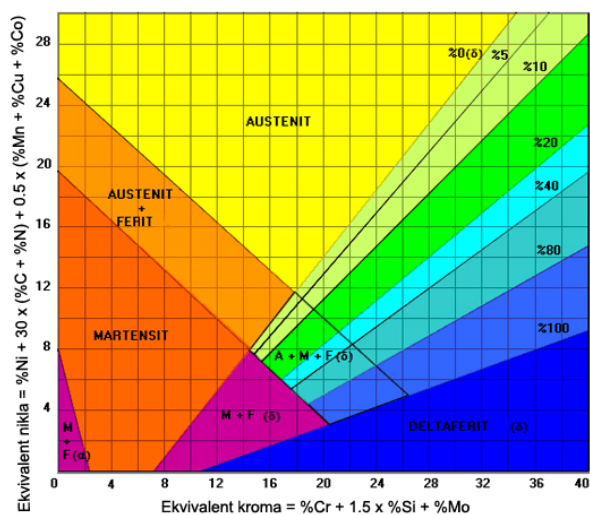
$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

2.2 Nehrđajući čelik

Nehrđajući je čelik po definiciji onaj čelik koji sadrži najmanje 12 % kroma, s dodavanjem ili bez dodavanja drugih legirajućih elemenata [7]. Poznato je da su određeni tipovi visokolegirajućega nehrđajućeg čelika vrlo otporni na koroziju u betonu, čak i kada je u okolišu prisutna velika koncentracija klorida [3].

Nehrđajući se čelici uglavnom dijele na sljedeće:

- martenzitne - nezanimljivi za upotrebu u građevinarstvu zbog velike krhkosti (udio ugljika 0,2 %-1,0 %)
- feritne - udio kroma 12 % – 17 %
- austenitne - udio kroma veći od 12 %, udio nikla 7 %
- austenitno - feritne (dupleks)(slika 2.).



Slika 2. Schaeffleov dijagram podjele nehrđajućih čelika [8]

Od četiri navedene grupe najčešće upotrebljavani su u građevinarstvu feritni, austenitni i dupleks čelici. Korozivna otpornost visokolegiranih austenitnih čelika kao armature u betonu u agresivnom okolišu dokazana je laboratorijskim istraživanjima [7, 9, 10] i upotrebom u konstrukcijama. Jedan od najpoznatijih primjera je konstrukcija Port of Progreso u Yucátanu, Mexico, koja je sagrađena 1941. godine te predstavlja najstariju betonsku konstrukciju armiranu nehrđajućim čelikom AISI 304 [11 - 13].

Svjetska ispitivanja nehrđajućih čelika usmjerena su prema razvijanju novih vrsta „niskolegiranih“ nehrđajućih čelika s manjim udjelom skupih legura, koji su otporniji na koroziju uzrokovanu kloridima u lužnatim medijima, a cijena im je znatno niža, pa je time njihova uporaba u građevinskim konstrukcijama ekonomski opravdana. Legure čelika sa smanjenim udjelom nikla i molibdena mogu imati cijenu manju od cijene nehrđajućeg čelika, a

gotovo jednaku korozivnu otpornost u alkalnom mediju. Čelik TOP12 stvoren na osnovi čelika 1.4003, pripada skupini niskolegiranih nehrđajućih čelika, te je njegova otpornost na koroziju u betonu do sada tek djelomično istražena [4]. Jedan je od takvih niskolegiranih nehrđajućih čelika i čelik 204Cu, legura čelika sa smanjenim udjelom nikla čija je cijena gotovo 35–40 % manja od cijene nehrđajućeg čelika, dok mu je korozivna otpornost u alkalnom mediju (poput porne vode betona) gotovo jednaka [5]. Nedavna istraživanja dupleks čelika, tipa 1.4362, pokazuju njegovu dobru otpornost na koroziju u betonu kontaminiranom kloridima, dok mu je cijena znatno jeftinija od cijene nehrđajućeg čelika zbog manjeg udjela molibdena i nikla [6].

3 Inženjerska svojstva nehrđajućih armatura

U hrvatskim propisima trenutačno ne postoji odredba koja se odnosi na primjenu nehrđajućih čelika kao armature u betonu i ne postoje granične vrijednosti svojstava koje određena vrsta nehrđajućih čelika mora zadovoljavati da bi mogla biti upotrijebljena kao armatura u betonu.

Osnovna mehanička i fizikalna svojstva koja su bitna za upotrebu metala kao armature u betonu jesu: granica popuštanja, vlačna čvrstoća i relativno izduženje te koeficijent toplinskog izduženja. Za potrebe ovog istraživanja izabrano je ukupno šest vrsta čelika čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 2., dok su njihova osnovna svojstva bitna za upotrebu kao armature u betonu prikazana u tablici 3. [14].

Tablica 2. Kemijski sastav odabranih vrsta nehrđajućih čelika

Tip čelika	Kemijski sastav							
	C	Si	Mn	S	N	Cr	Mo	Ni
Obični armaturni čelik								
B500B	0,19	0,1	0,62	0,022	0,005	0,07	<0,02	0,02
Feritni								
TOP12	≤0,03	≤1,0	≤1,5	≤0,015	≤0,03	10,5 - 12,5	-	0,3 - 1,0
Austenitni								
204Cu	≤0,1	≤2,0	7,5 - 8,5	≤0,003	0,15 - 0,30	16,0 - 18,0	≤1,0	<2,0
1.4301	≤0,07	≤1,0	≤2,0	≤0,015	≤0,11	17,0 - 19,5	-	8,0 - 10,5
1.4306	≤0,03	≤1,0	≤2,0	≤0,015	≤0,11	18,0 - 20,0	-	10,0 - 12,0
Dupleks								
1.4462	≤0,03	≤1,0	≤2,0	≤0,015	0,1 - 0,22	21,0 - 23,0	2,5 - 3,5	4,5 - 6,5
1.4362	≤0,03	≤1,0	≤2,0	≤0,015	0,05 - 0,2	22,0 - 24,0	0,1 - 0,6	3,5 - 5,5

3.1 Mehanička i fizikalna svojstva

Mehanička i fizikalna svojstva odabranih vrsta nehrđajućih čelika dana su u tablici 3. [14, 15].

Tablica 3. Mehanička svojstva odabranih vrsta nehrđajućih čelika

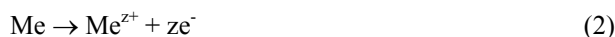
Tip čelika	Granica poštavanja MPa	Vlačna čvrstoća MPa	Relativno izduženje %	Toplinski koeficijent K ⁻¹
B500B	631	737	6.9	10×10 ⁻⁶
TOP12	566	748	8.2	11×10 ⁻⁶
204Cu	688	872	18.0	17×10 ⁻⁶
1.4301	882	992	10.3	
1.4306	697	825	5.7	
1.4462	1005	1138	2.1	12×10 ⁻⁶
1.4362	759	884	3.5	

Iz pregleda mehaničkih svojstava vidi se da nehrđajući čelici imaju jednaku ili veću vlačnu čvrstoću od običnoga armaturnog čelika. Dupleks čelici imaju najbolja mehanička svojstva i dosežu vlačnu čvrstoću veću od 1000 MPa. Većina nehrđajućih čelika ima mehanička svojstva koja zadovoljavaju uvjete za čelike za armiranje. Problem koji još treba istražiti jest premalo relativno izduljenje kod nekih vrsta dupleks čelika.

Toplinski koeficijent feritnih čelika (11×10⁻⁶ K⁻¹) približno je jednak toplinskom koeficijentu betona (10×10⁻⁶ K⁻¹). S druge strane, toplinski je koeficijent malo veći kod austenitnih čelika. Iako postoji razlika u toplinskom koeficijentu, ta razlika nije tako značajna da bi uzrokovala dodatna naprezanja zbog zagrijavanja ili hlađenja armiranobetonskog elementa.

3.2 Korozijska svojstva

Svaki metal u određenom mediju ima tendenciju otapanja ionizacijom, odnosno tendenciju da otpušta atome iz kristalne rešetke u medij u obliku kationa uz oslobađanje elektrona [16]. Ta se reakcija naziva reakcijom oksidacije (2). Ti oslobođeni elektroni bivaju vezani prilikom redukcije vodika ili kisika, ovisno o tome radi li se o kiselom ili lužnatom mediju. U pornoj vodi betona oslobođeni elektroni troše se, odnosno bivaju vezani u reakciji redukcije kisika (3).

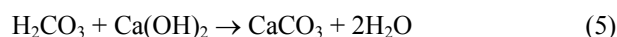


Svaka od ovih reakcija ima svoj ravnotežni elektrodni potencijal koji ovisi o vrsti metala i medija u koji je metal uronjen. Ako je elektrodni potencijal redukcije (3) viši od reakcije ionizacije (2), metal je u aktivnom stanju. Što je razlika između tih dviju reakcija veća, povećava

se i afinitet metala da u tom mediju korodira. Metali poput kroma i nikla smatraju se plemenitijim metalima u odnosu na čelik upravo zbog činjenice da im je elektrodni potencijal puno pozitivniji, pa su zbog toga manje skloni koroziji. Na promjenu afiniteta metala prema koroziji utječe pH-vrijednost medija u kojem se metal nalazi, što se najčešće prikazuje tzv. Pourbaixovim dijagramom.

Kvalitetan i nekarbonatizirani beton ima veliki pH – veći od 12. Površina ugljičnog i nehrđajućih čelika u medijima s velikim pH pasivira se elektrokemijskom oksidacijom, čime na površini nastaje tanki pasivni sloj željezovog oksida kod ugljičnog čelika, odnosno kromovog oksida kod nehrđajućih čelika [11]. U kvalitetnom i nekarbonatiziranom betonu, u kojem nema klorida, armatura je u principu otporna na koroziju, bilo da se radi o ugljičnom bilo o nehrđajućem čeliku, jer je zaštićena upravo tim pasivnim slojem.

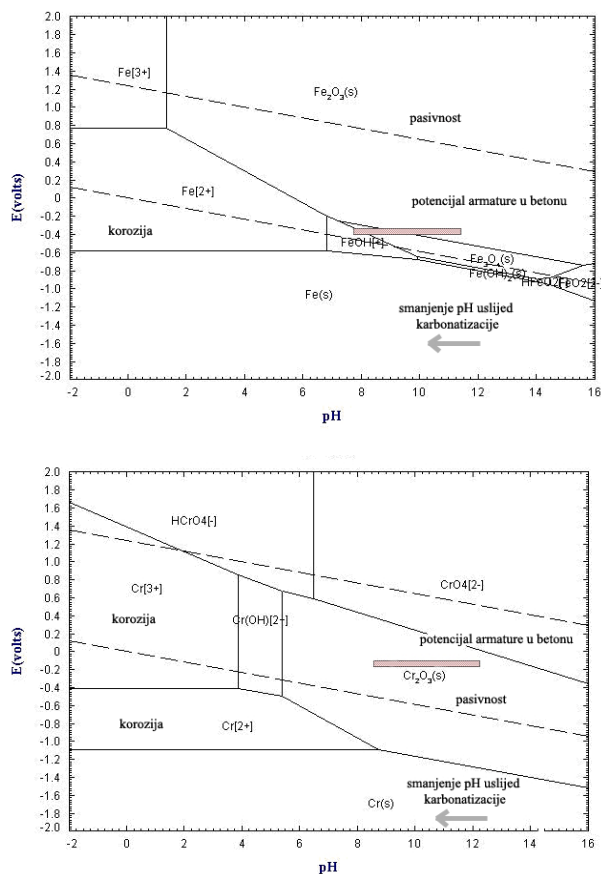
Poradi procesa karbonatizacije pH betona se smanjuje te može doseći vrijednost manju od 9. Razlog tome je što se ugljični dioksid iz atmosfere pri reakciji s vodom pretvara u kiselinu koja zatim neutralizira alkalije u betonu prema sljedećem izrazu [18]:



Pri tako malom pH ugljični čelik više nije pasivan, nego je njegovo pasivno stanje nestabilno. S druge strane krom je i pri manjem pH (oko 7) pasivan, a oksidni film oko armature stabilan, što se vidi iz Pourbaixova dijagrama. Na slici 3. prikazani su Pourbaixovi dijagrami za čelik i krom. Ponašanje nehrđajućih čelika približno odgovara Pourbaixovu dijagramu za krom, dok ponašanje ugljičnog čelika približno odgovara Pourbaixovu dijagramu za željezo [17].

Do korozije armature može doći i ako je beton jako alkaln, u slučaju kada je u betonu prisutna određena količina klorida. Utjecaj kloridnih iona na depasivaciju armature, i pri velikom pH porne vode, može se objasniti kao "natjecanje" dvaju procesa: stvaranje i obnavljanje pasivnog filma od strane hidroksilnih iona i razaranje filma djelovanjem kloridnih iona. Kad kloridni ion jednom razori zaštitni pasivni sloj oko armature, omogućen je pristup novim kloridnim ionima. Zbog toga dolazi do formiranja željezo-klorida kod obične armature, odnosno krom-klorida kod nehrđajućih armatura koji se u reakciji s vodom i kisikom rastvara na hidroksid metala, slobodni vodik i kloridni ion, što dovodi do daljnjega lokaliziranog razaranja pasivnog sloja i formiranja toka struje između anodnih i katodnih područja armature [19].

Jednom kad dođe do razaranja pasivnog sloja dolazi do otapanja čelika, što u konačnici dovodi do mjestimičnog smanjenja poprečnog presjeka armature. Ovaj oblik korozije naziva se jamičastom korozijom (engl. *pitting corrosion*).



Slika 3. Pourbaixov dijagram za čelik (gore) i krom (dolje) [16]

Nehrđajući čelici su puno otporniji na djelovanje klorida, odnosno na jamičastu koroziju, od ugljičnog čelika. Ta korozijska otpornost ovisi o količini pojedinih legirajućih elemenata, poput kroma, molibdena i dušika. U



Slika 4. Sustav za elektrokemijska ispitivanja korozijske otpornosti

svrhu uspoređivanja korozijske otpornosti pri djelovanju klorida različitih vrsta nehrđajućih čelika, količina legirajućih elemenata izražava se tzv. ekvivalentom otpornosti jamičastoj koroziji (*Pitting resistance equivalent number- PREN*) [3]. Za austenitne čelike ekvivalent PREN računa se prema sljedećem izrazu:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N} \quad (6)$$

Za duplex čelike ekvivalent PREN računa se prema sljedećem izrazu:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + 30 \times \% \text{N} \quad (7)$$

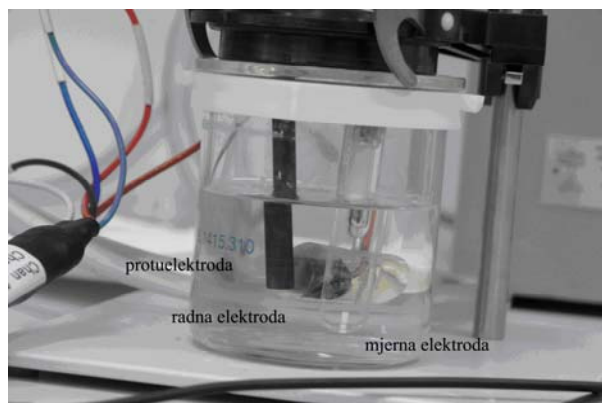
Tablica 4. prikazuje ekvivalente PREN nehrđajućih čelika koji se mogu upotrebljavati u građevinarstvu.

Tablica 4. Ekvivalente PREN odabranih vrsti nehrđajućih čelika

Tip čelika	PREN
1.4006	11
204Cu	18 - 20
1.4301	18
1.4306	19
1.4362	24
1.4462	29

4 Korozijska ispitivanja

U svrhu ispitivanja korozijske otpornosti nehrđajućih čelika kao armature u betonu mogu se provoditi promatranja pojave korozije armature u betonu u agresivnom okolišu. Takva vrsta realnih ispitivanja je dugotrajna, s obzirom da se vidljiva oštećenja od korozije javljaju tek nakon nekoliko godina [20]. S druge strane mjerodavne rezultate daju ubrzana ispitivanja koja se provode u laboratoriju, elektrokemijskim metodama na uzorcima izloženim pornoj vodi betona. U ovom radu ispitivanja su provedena u pornoj vodi s pH 12,4 koja simulira

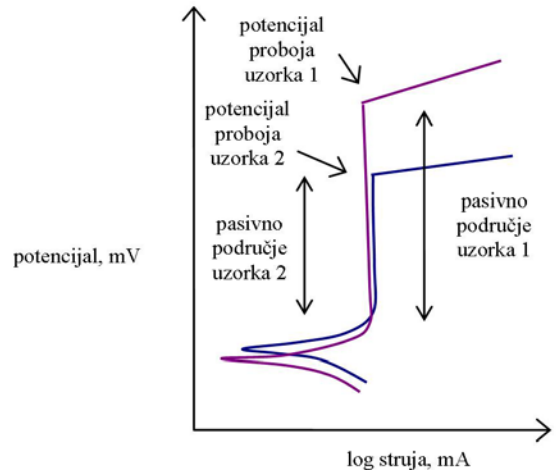


nekarbonatizirani beton i u pornoj vodi s pH 10,1 koja simulira karbonatizirani beton. Pornim su vodama dodane različite količine kloridnih iona u svrhu simuliranja betona u agresivnom morskom okolišu, uz djelovanje karbonatizacije.

Mjerenja su provedena uz pomoć potenciostata PAR VMP2 (slika 4.- lijevo) s troelektrodnim sustavom, gdje je ispitivani čelik radna elektroda, zasićena je kalomel elektroda (SCE) mjerna elektroda i grafitni štapić tzv. protuelektroda (slika 4. - desno).

Elektrokemijska ispitivanja čelika u pornoj vodi provedena su mjerenjem potencijala otvorenog strujnog kruga i metodom linearne polarizacije. Ispitivanja su provedena nakon jednosatnog izlaganja otopini, pri čemu je pušteno da se potencijal ispitivanog čelika stabilizira. Tijekom toga sata mjereno je potencijal otvorenoga strujnog kruga. Iz potencijala otvorenoga strujnog kruga, odnosno iz njegove promjene u vremenu, moguće je ocijeniti tendenciju metala prema koroziji. Ako je potencijal otvorenog strujnog kruga stabilan ili teži prema pozitivnijim vrijednostima, može se pretpostaviti da je pasivni sloj oko metala u tom mediju stabilan. Ako potencijal otvorenog kruga teži prema negativnijim vrijednostima, može se pretpostaviti da je pasivni sloj na metalu nestabilan te da će doći, ili je došlo, do lokalizirane korozije. Nakon jednosatnog izlaganja čelika otopini, provedena je linearna polarizacija, i to promjenom potencijala ispitivanog čelika od potencijala otvorenog kruga do 0,8 V, brzinom 10 mV/s, pri čemu su promjene potencijala i struje mjerene svake sekunde [23]. Metodom linearne polarizacije moguće je provjeriti je li uzorak otporan na jamičastu koroziju. Što je šire pasivno područje, odnosno što je potencijal proboja pasivnog sloja pozitivniji, to je metal otporniji prema jamičastoj koroziji [21, 22]. Na slici 5. shematski je prikazan grafikon linearne polarizacije za dva uzorka, gdje se vidi da je pasivno područje

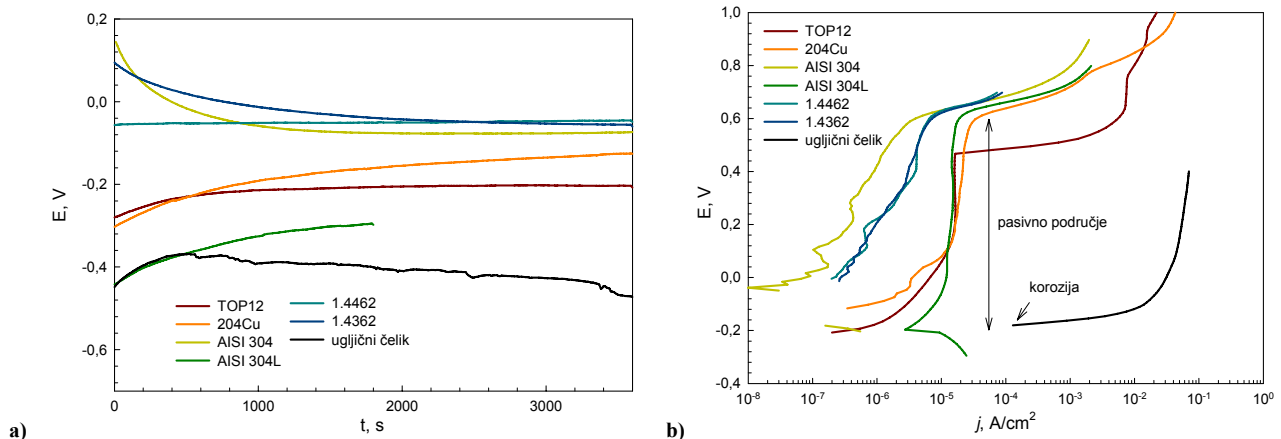
uzorka 1 šire od pasivnog područja uzorka 2, odnosno da je potencijal proboja uzorka 1 pozitivniji od potencijala proboja uzorka 2. Iz toga je moguće zaključiti da je uzorak 1 otporniji prema jamičastoj koroziji u mediju u kojem je ispitivan.



Slika 5. Grafikon linearne polarizacije

Na slikama 6. do 9. prikazani su rezultati elektrokemijskih ispitivanja šest odabranih vrsta nehrđajućih čelika te su uspoređeni s rezultatima ispitivanja običnoga armaturnog čelika u nekarbonatiziranoj i karbonatiziranoj pornoj otopini s različitim koncentracijama kloridnih iona. Na slikama oznake a) prikazana je promjena potencijala otvorenog strujnog kruga ispitivanih čelika u određenom mediju prije polariziranja. Iz promjene potencijala čelika moguće je predvidjeti tendenciju određene vrste čelika prema koroziji u tom mediju [21, 22]. Na slikama oznake b) prikazane su krivulje potencijal - struja pri linearnoj polarizaciji.

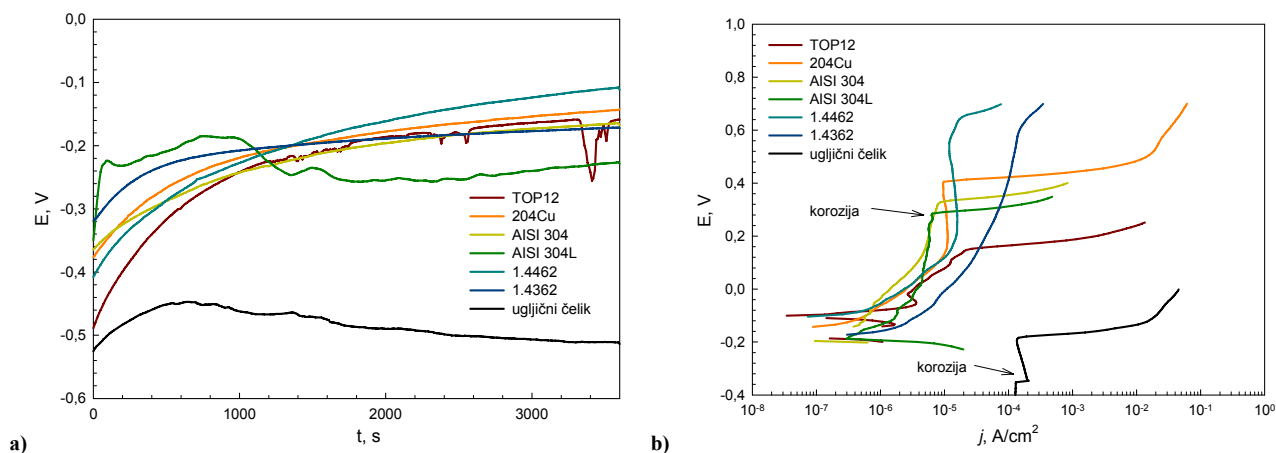
Na slikama 6.a) i 6.b) prikazani su rezultati ispitivanja čelika u pornoj otopini pH 12,4 s 0,3 % kloridnih iona, a na slikama 7.a) i 7.b) s 1,0 % kloridnih iona.



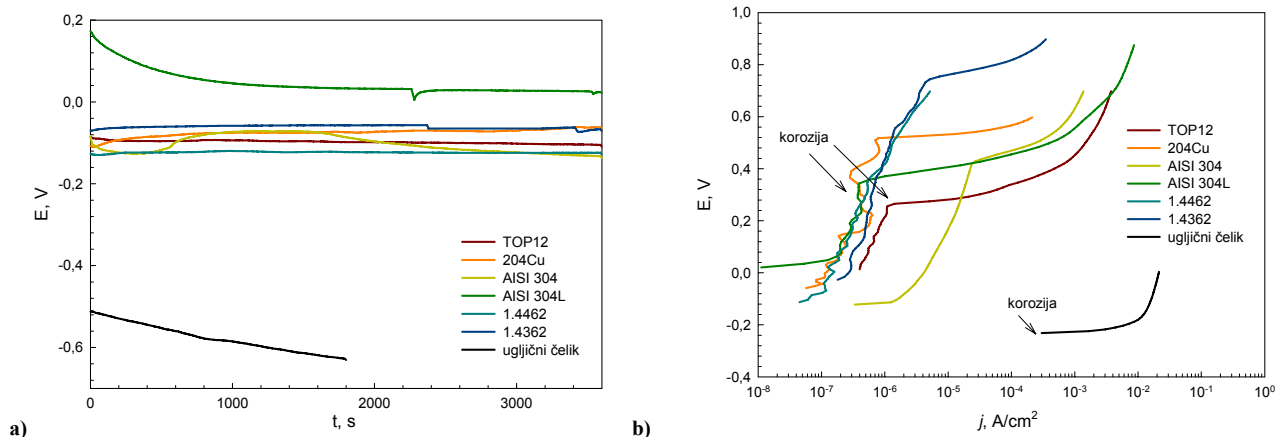
Slika 6. Rezultati ispitivanja čelika u pornoj vodi pH 12,4 s 0,3 % kloridnih iona: a) promjena potencijala; b) linearna polarizacija

Iz dijagrama prikazanih na slici 6. vidi se da su sve vrste ispitivanih čelika pasivnije u nekarbonatiziranom betonu kontaminiranom kloridima, nego što je to obični armaturni čelik. Već pri dodavanju 0,3 % kloridnih iona vrijednost potencijala otvorenog kruga običnog čelika počinje opadati, dok vrijednost potencijala ostalih čelika raste (slika 6.a). Na polarizacijskim krivuljama nehrđajućih čelika (slika 6. b) vidljivo je široko pasivno područje

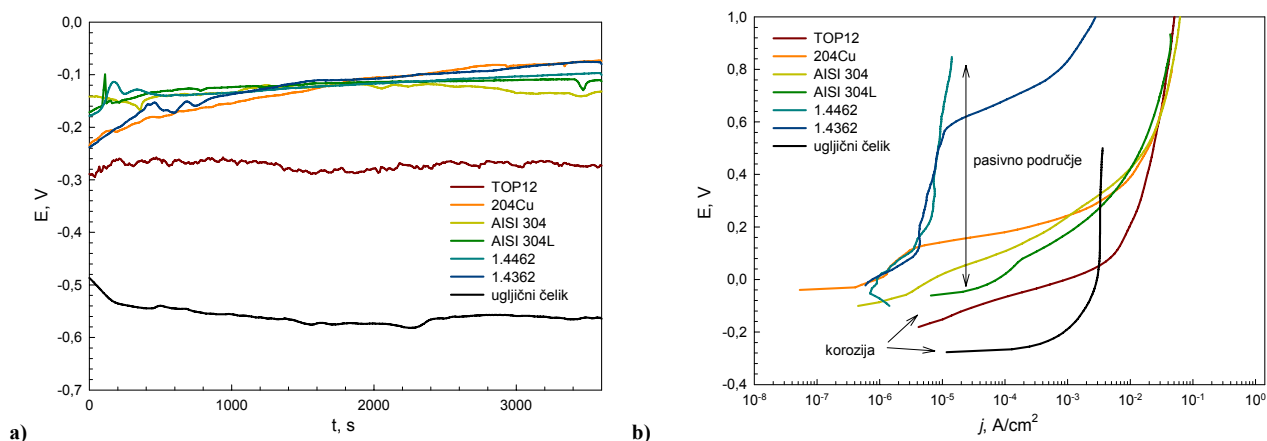
te se potencijali proboja javljaju na znatno pozitivnijim potencijalima. Takvo ponašanje upućuje na znatniju otpornost ovih čelika prema jamičastoj koroziji u usporedbi s običnim armaturnim čelikom. Dodatkom znatnije količine kloridnih iona od 1,0 % na masu porne vode vidi se da vrijednost potencijala običnog čelika počinje znatno opadati (slika 7.a), što pokazuje nestabilnost i vjerojatnost pojave korozije. S druge strane, vrijednosti



Slika 7. Rezultati ispitivanja čelika u pornoj vodi pH 12,4 s 1,0 % kloridnih iona: a) promjena potencijala; b) linearna polarizacija



Slika 8. Rezultati ispitivanja čelika u pornoj vodi pH 10,1 s 0,1 % kloridnih iona: a) promjena potencijala; b) linearna polarizacija



Slika 9. Rezultati ispitivanja čelika u pornoj vodi pH 10,1 s 0,3 % kloridnih iona: a) promjena potencijala; b) linearna polarizacija

potencijala ostalih čelika teže prema pozitivnijim vrijednostima. Na slici 7.b) vidimo da dupleks čelici 1.4362 i 1.4462 pokazuju najšire pasivno područje s znatno pozitivnijim potencijalima proboja pasivnog filma u odnosu na ostale čelike. Feritni i austenitni čelici (204Cu, TOP12, 304 i 304L) pokazuju znatno uže pasivno područje od dupleks čelika, ali su i dalje otporniji prema koroziji od običnog armaturnog čelika.

Na slikama 8.a) i 8.b) prikazani su rezultati ispitivanja čelika u pornoj otopini pH 10,1 s 0,1 % kloridnih iona, a na slikama 9.a) i 9.b) s 0,3 % kloridnih iona.

Iz dijagrama prikazanih na slici 8. vidi se da su sve vrste ispitivanih čelika pasivnije u karbonatiziranom betonu kontaminiranom kloridima, nego što je to obični armaturni čelik. Vrijednost potencijala otvorenog kruga običnoga armaturnog čelika već pri 0,1% kloridnih iona u pornoj vodi pH 10,1 počinje znatno padati, što se vidi na slici 8.a), dok je na slici 8.b) vidljivo da je obični armaturni čelik nestabilan te odmah počinje korodirati. Pri velikim količinama klorida od 0,3 % (slike 9.a) i 9.b) dupleks čelici (1.4362 i 1.4462) i dalje pokazuju najšire pasivno područje sa znatno pozitivnijim potencijalima proboja pasivnog filma u odnosu na ostale čelike, dok su feritni i austenitni čelici (204Cu, TOP12, 304 i 304L) manje otporni na jamičastu koroziju, ali i dalje otporniji od običnoga armaturnog čelika.

5 Zaključak

Zahtjevi za 100-godišnjim uporabnim vijekom velikih građevina i golemi troškovi popravaka uzrokovani nemogućnošću zadovoljenja tih zahtjeva, uzrokovali su razvi

tak mnogih metoda za povećanje trajnosti armiranobetonskih konstrukcija. Jedna je od takvih metoda i primjena nehrđajućih čelika otpornih na koroziju, kao zamjena dijela ili cijele armature od ugljičnog čelika u betonu, u slučaju kada se konstrukcija nalazi u vrlo agresivnom okolišu.

U ovom su radu prikazane neke vrste nehrđajućih čelika koje mogu biti primijenjene kao armatura u betonu, a prikazana su i njihova mehanička i korozijska svojstva koja upotrebu tih čelika u betonu opravdavaju. Ubrzanim elektrokemijskim ispitivanjima kakva su prikazana u ovom radu, moguće je jednostavno i brzo dokazati korozijsku otpornost tih čelika u izrazito agresivnom okolišu. Rezultati prikazani u ovom radu ukazuju na različite nivoe korozijske otpornosti pojedinih vrsta nehrđajućih čelika u betonu, ovisno o stupnju agresivnosti okoliša kojem su izloženi. Za upotrebu u armiranobetonskim konstrukcijama to bi značilo da se vrsta korozijski otporne armature izabire ovisno o zahtijevanom uporabnom vijeku i razredu izloženosti projektirane armiranobetonske konstrukcije.

Rezultati prikazani u ovome radu pokazuju da se niže legirani nehrđajući čelici (poput čelika TOP12 i 204Cu) mogu rabiti u srednje agresivnim, austenitni čelici (poput 304 i 304L) u agresivnim, a dupleks čelici (poput čelika 1.4362 i 1.4462) u izrazito agresivnim morskim okolišima, a sve u svrhu prevencije korozije armature i produljenja uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija.

ZAHVALA

Istraživanja opisana u ovome radu provedena su u sklopu znanstvenog projekta Ministarstva obrazovanja, znanosti i sporta "Razvoj novih materijala i sustava zaštite betonskih konstrukcija" (082-0822161-2159) i međunarodnog projekta "ARCHES" (TST5-CT-2006-031272).

LITERATURA

- [1] Tehnički propis za betonske konstrukcije (TPBK), NN br. 101/05, 139/09, 14/10.
- [2] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R. B. *Corrosion of Steel in Concrete Prevention, Diagnosis, Repair*, Wiley – VCH, Weinheim, 2004.
- [3] Nürberger, U. *Stainless Steel in Concrete*, State of the Art Report, The European Federation of Corrosion, The Institute of Materials, London; UK, 1996.
- [4] Hasler, S., Heinmann, W. A., Nussbaum, G., Urlau, U., Schiegg, Y., Voute, C. H., Böhni, H., Lima, M., Kurz, W., Kohler, H. R., Bischoff, C. TOP12 - *The innovative reinforcing steel*, Materials Week, Munich, Paper No. 665, 2000
- [5] Bautista, A., Blanco, G., Velasco, F. *Corrosion behaviour of low-nickel austenitic stainless steels reinforcements: A comparative study in simulated pore solutions*, Cement and Concrete Research 36, 2006, Issue 10, p. 1922-1930
- [6] Chauveau, E., Demelin, B. *New lean duplex stainless steel rebar: pitting corrosion resistance and galvanic coupling behaviour*, Proceedings of the 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading, Tours, France, 2007, p. 1859-1866
- [7] Bertolini, L., Gastaldi, M., Pedferri, M. P., Pedferri, P. *Stainless Steel in Concrete*, European Community, COST 521 Workshop, Utrecht, 2000.
- [8] <http://www.oerlikon.com.tr>
- [9] Veleva L., Alpuche-Aviles M. A., Graves-Brook, M. K., Wipf, D. O. *Voltammetry and surface analysis of AISI 316 stainless steel in chloride-containing simulated concrete pore environment*, Journal of Electroanalytical Chemistry, Volume 578, Issue 1, 2005, p. 45-53
- [10] Blanco, G., Bautista, A., Takenouti, H. *EIS study of passivation of austenitic and duplex stainless steels reinforcements in*

- simulated pore solutions*, Cement and Concrete Composites, Volume 28, Issue 3, 2006, p. 212-219
- [11] Castro-Borges, P., Cardenas, A., Torres-Acosta, A., Martinez-Madrid, M., Moreno, E., Troconis de Rincon, O. *Chloride profiles in a 63-year old concrete pier reinforced with 304 stainless steel in Mexico*, Proceedings of the 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading, Tours, France, 2007.p. 143-150
- [12] Gedge, G. *Structural uses of stainless steel – building and civil engineering*, Journal of Constructional Steel Research 64, 2008, pp. 1194 - 1198
- [13] Baddoo, N.R. *Stainless Steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities*, Journal of Constructional Steel Research 64, 2008, pp. 1199 - 1206
- [14] Leban, M., Serdar, M., Stipanović Oslaković, I. Šajna, A., Kuhar, V., Legat, A., Polder, R. *1st year Report of the project Assessment and Rehabilitation of Central European Highway Structures* (ARCHES), 2007, <http://arches.fehrl.org/>
- [15] Force Technology, *Stainless steel reinforcement "State-of-the-art" Report*, 1997, p. 24
- [16] Esih, I., Dugi, Z. *Tehnologija zaštite od korozije*, Školska knjiga Zagreb, 1990.
- [17] Esih, I. *Pasivnost nehrđajućih čelika*, Nehrđajući čelici problemi u primjeni, Centar za transfer tehnologije, Zagreb, 2008.
- [18] Broomfield, J.P. *Corrosion of steel in concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN Spon, London, UK, 1997.
- [19] Bentur, A., Diamond, S., Berke N.S. *Steel Corrosion in Concrete*, E & FN Spon, UK, 1997.
- [20] Stipanović, I., Bjegović, D., Mikulić, D., Serdar, M. *Time dependent changes of durability properties of concrete from Maslenica Bridge at the Adriatic coast, Integral Service Life Modelling of Concrete Structures*, RILEM Publications S.A.R.L., 2007., pp. 87-95
- [21] Martinez, S., Štern, I. *Korozija i zaštita – eksperimentalne metode*, HINUS, Zagreb, 1999.
- [22] Kelly, G. R., Scully, J. R., Shoesmith, D. W., Buchheit, R. G. *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*, Marcel Dekker, USA, 2003.
- [23] Stipanović, I.; Serdar, M., Bjegović, D. *Using Inhibitors to Protect Steel Prestressing in High Performance Grouts*, Materials Performance 46, 2007, 3; 40-44

Dvostruka nosivost
umjesto skupog trošenja materijala

Inovacija kod komponenti!
Bauma - od 19.04.2010
 Otvoreni izložbeni prostor Sjever F8, štand N811

www.doka.com

doka
 Stručnjaci za oplata