

**ISTRAŽIVANJE UTICAJA VODOCEMENTNOG FAKTORA NA
BRZINU KOROZIJE BETONA I ČELIČNE ARMATURE
UZROKOVANE SOLIMA MAGNEZIJA**

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF WATER TO CEMENT
RATIO TO SPEED THE CORROSION OF CONCRETE AND
REINFORCING STEEL CAUSED BY SALTS OF MAGNESIUM**

**Prof. dr. sc. Farzet Bikić, vanredni profesor
Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale
Zenica, BiH**

**As. Dejana Brkić, dipl. ing.
Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale
Zenica, BiH**

Ključne riječi: cementni malter, čelična armatura, potenciodinamska polarizacija, pritisna čvrstoća, vodocementni faktor

REZIME

Rad predstavlja istraživanje uticaja vodocementnog faktora, w/c , na brzinu korozije betona i čelične armature u betonu uzrokovane solima magnezija. Uzorci su pripremani varirajući w/c i to 0,5 i 0,7. Ispitivani uzorci su potapani devet mjeseci u sljedeće otopine: 5% $MgCl_2$, 5% $MgSO_4$, 5% $MgCl_2 + 5\% MgSO_4$, H_2O . Nakon devet mjeseci pristupilo se ispitivanju brzine korozije. Ispitivanje korozije betona se sprovodilo mjerenjem pritisne čvrstoće uzoraka na hidraulično presi „Matest“ od 2000 kN. Ispitivanje korozije čelične armature u cementnom malteru se sprovodilo na mjernom uređaju kojeg sačinjavaju elektrohemijska ćelija i potenciostat/galvanostat EG&G/PAR Model 263A-2. Rezultati ispitivanja korozije čelične armature su dati u formi krivih anodne polarizacije čeličnih armatura u cementnom malteru, dobivenih metodom potenciodinamske polarizacije. Rezultati pokazuju da je brzina korozije betona i armature puno veća na uzorcima pripremanim s većim vodocementnim faktorom u svim otopinama.

Key words: cement mortar, reinforcing steel, potentiodynamic polarization, compressive strength, water to cement ratio

SUMMARY

The paper presents investigation of the influence of water to cement ratio, w/c , to speed the corrosion of concrete and reinforcing steel in concrete caused by salts of magnesium. The samples were preparatory varying w/c (0,5 and 0,7). The test samples were treated nine months in the following solutions: 5% $MgCl_2$, 5% $MgSO_4$, 5% $MgCl_2 + 5\% MgSO_4$, H_2O . After nine months followed by testing the speed of corrosion. Corrosion testing of concrete was conducted by measuring the compressive strength of samples in a hydraulic press "Matest" of 2000 kN. Testing of corrosion of

reinforcing steel in cement mortar is carried on the measuring device which consists of an electrochemical cell and potentiostat/galvanostat EG&G/PAR Model 263A. Results of corrosion of reinforcing steel are presented in form of anode polarization curves of reinforcement steel in cement mortar, using method of potentiodynamic polarization. The results show that the corrosion rate of concrete and reinforcing steel is much greater in the samples prepared with higher water cement ratio in all solvents.

1. UVOD

Za betonske i armirano-betonske konstrukcije veliku opasnost predstavljaju soli magnezija uglavnom sulfati i hloridi magnezija. Osnovni procesi koji se odigravaju u cementnom kamenu u prisustvu otopina soli magnezija zasnivaju se na njihovoj reakciji s kalcij-hidroksidom [1]:



Kao proizvod reakcija (1) i (2) nastaje magnezij-hidroksid čija je topivost mala ($18,2 \text{ mgdm}^{-3}$ na sobnoj temperaturi) i kao takav se taloži. Vezivanjem OH^- jona u magnezij-hidroksid je praćeno smanjenjem pH vrijednosti otopine u porama cementnog kamena, do $\text{pH}=10$ [1]. Inače je pH u porama betona u intervalu od 12,5 do 13,5, zahvaljujući kalcij-hidroksidu koji nastaje u procesu hidratacije cementa [2]. Smanjenje pH betona vodi povećanju intenziteta korozije i betona i čelične armature u betonu. Čelična armatura je u zdravom betonu čiji je pH 12,5 do 13,5 zaštićena filmom oksidiranog željeza, sastava (FeO.OH) ili Fe_2O_3 , koji u normalnim uslovima uzrokuje pasivizaciju armature [3]. Poroznost betona i koeficijent difuzije direktno zavise o vodocementnom faktoru. Povećanjem vodocementnog faktora dolazi do stvaranja kapilarnih pora u betonu zbog isparavanja suvišne vode, čime agensi korozije lakše prodiru u beton, samim tim i do površine čelične armature, izazivajući koroziju betona i armature.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

Za ispitivanje uticaja vodocementnog faktora na brzinu korozije čelične armature u betonu uzrokovanu solima magnezija korištena je glatka čelična armatura hemijskog sastava prikazanog u tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivane čelične armature

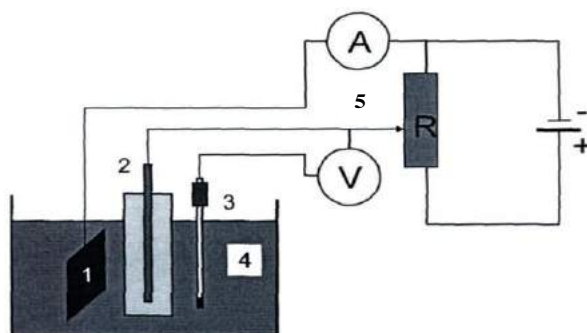
Element	C	Si	Mn	S	P	B	Zn	Cr	Mo	Cu	Ni
Mas. %	0,11	0,12	0,38	0,012	0,021	<0,001	0,002	0,02	<0,01	0,09	0,04

Za izvođenje eksperimenta upotrijebljen je cement čija je mineraloška analiza klinkera data u tabeli 2. Cement CEM II/B-W 42,5N je proizvod Tvornice cementa „Kakanj“, gdje je i rađena mineraloška analiza klinkera. Agregat korišten za spravljanje cementnog maltera je standardni pijesak DIN EN 196-1.

Tabela 2. Mineraloška analiza cementnog klinkera

Sadržaj osnovnih cementnih minerala, mas. %			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
66.37	8.32	9.62	10.77

Ispitivanje korozije čelične armature u uzorcima cementnog maltera je vršeno u elektrohemijskoj ćeliji koja sadrži tri elektrode (Slika 1). Radnu elektrodu predstavlja sam uzorak čelične armature u cementnom malteru. Kao referentna elektroda u ovim ispitivanjima je korištena zasićena kalomel elektroda (SCE), a treća, pomoćna elektroda, je od grafita i ima ulogu da provodi električnu struju od strujnog izvora kroz otopinu do radne elektrode. Radne elektrode, uzorci, su pripremane od cementnog maltera u kojem je odnos mase cementa i agregata 1:3. Uzorci za ispitivanje brzine korozije čelične armature u betonu predstavljaju cilindrična tijela od cementnog maltera, dimenzija 80x40 mm, u čijim sredinama je ugrađena čelična armatura prečnika $\phi \approx 6$ mm, dužine 120 mm. Površina aktivnog dijela armatura je iznosila 9 cm². Dimenzije pripremljenih uzoraka kao i postupak njihove pripreme propisuje standard HRN U.M1.044 [4]. Uzorcima je variran vodocementni faktor (0,5 i 0,7). Pripremljeni uzorci su nakon dvadeset i četiri časa držanja u kalupu na $t = 20 \pm 1$ °C vađeni iz kalupa i potapani u otopine: 5% MgCl₂, 5% MgSO₄, 5% MgCl₂ + 5% MgSO₄, H₂O, u kojim su tretirani devet mjeseci. Nakon devet mjeseci uzorci su pojedinačno vađeni i potapani 24 sata u otopine zasićenog Ca(OH)₂, nakon čega im je snimana brzina korozije na armaturi. Ispitivanje korozije čelične armature u betonu se sprovodilo na mjernom uređaju kojeg sačinjavaju elektrohemijska ćelija i potenciostat/galvanostat EG&G PARC, model 263A-2 (Slika 1).



Slika 1. Shematski prikaz uređaja za ispitivanje brzine korozije armature u betonu [4]
 1 – pomoćna elektroda, 2 – radna elektroda, 3 – referentna elektroda, 4 – elektrolit,
 5 – potenciostat/galvanostat

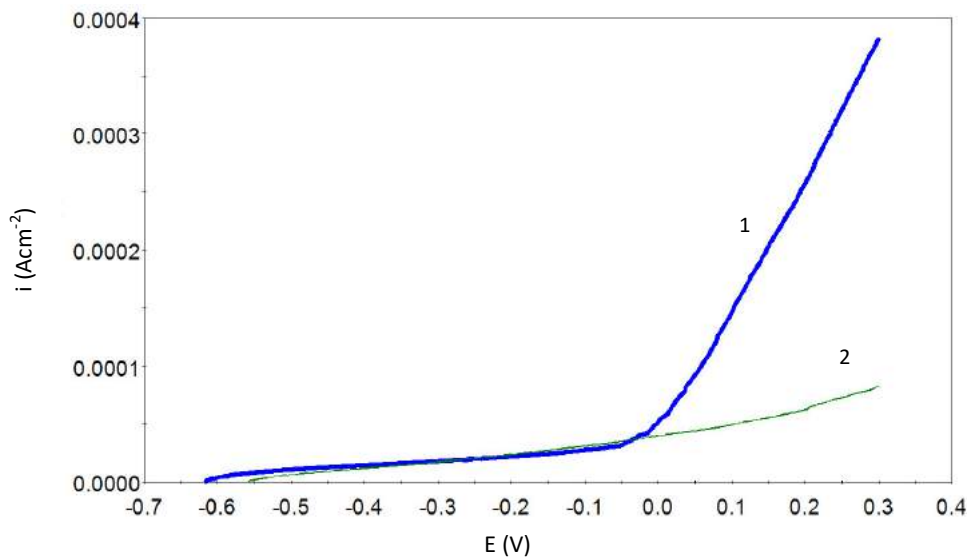
Rezultati ispitivanja korozije čelične armature su dati u formi krivih anodne polarizacije čeličnih armatura u cementnom malteru, dobivenih metodom potenciodinamske polarizacije. U cilju ispitivanja uticaja vodocementnog faktora na brzinu korozije betona uzrokovanu solima magnezija pripremani su prizmatični uzorci od cementnog maltera dimenzija 7x7 cm (Slika 2). Također i ovim uzorcima je variran vodocementni faktor (0,5 i 0,7). Korozija betona određivana je ispitivanjem pritiska čvrstoće navedenih uzoraka prema normi EN 12390-3. Navedeni uzorci su nakon vađenja iz kalupa potapani u otopine 5% MgCl₂, 5% MgSO₄, 5% MgCl₂ + 5% MgSO₄, u kojim su tretirani devet mjeseci, nakon čega im je određivana pritisna čvrstoća.



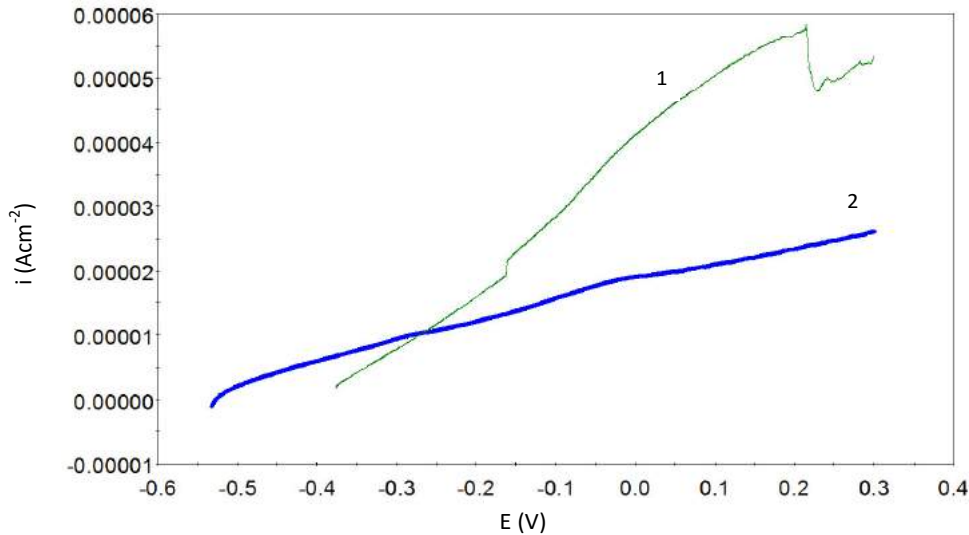
Slika 2. Prizmatični uzorci za ispitivanje pritiskne čvrstoće prema normi EN 12390-3

3. REZULTATI I DISKUSIJA

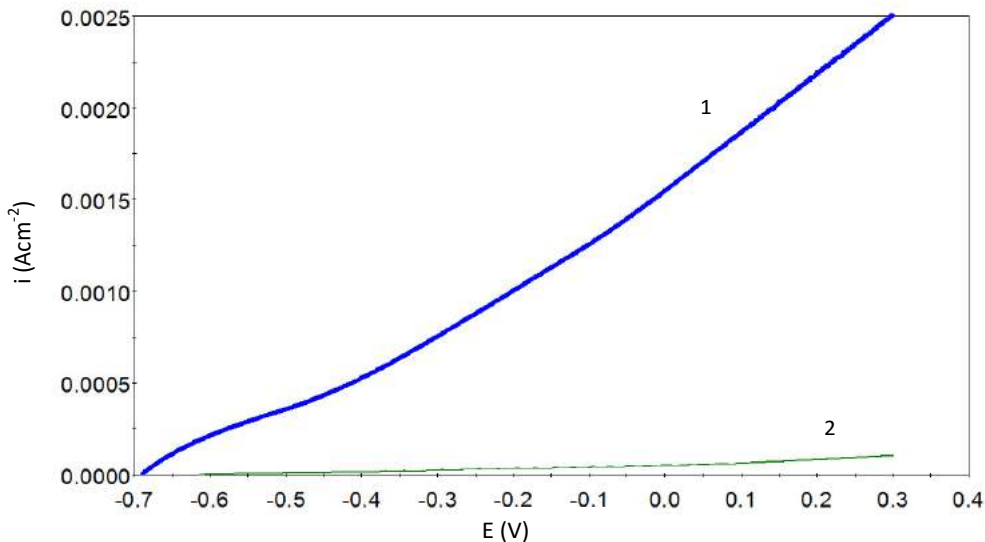
Rezultati ispitivanja uticaja vodocementnog faktora na brzinu korozije čelične armature u betonu uzrokovanu solima magnezija prikazani su na slikama 3, 4 i 5. Upoređivana je brzina korozije varirajući vodocementni faktor, 0,5 i 0,7. Poređenjem nagiba krivih anodne polarizacije na dijagramima gustina struje/potencijal može se ocijeniti koroziona aktivnost na radnim elektrodama. S obzirom na to da je gustina struje proporcionalna koncentraciji korozivnih produkata, kriva s većim nagibom pokazuje veću korozionu aktivnost [5]. Rezultati (Slike 3, 4 i 5) pokazuju da je brzina korozije radnih elektroda tretiranih u svim navedenim otopinama veća u slučaju vodocementnog faktora 0,7 u odnosu na 0,5.



Slika 3. Anodne polarizacijske krivulje uzoraka tretiranih u otopini 5% $MgCl_2$.
1 - $v/c = 0,7$; 2 - $v/c = 0,5$

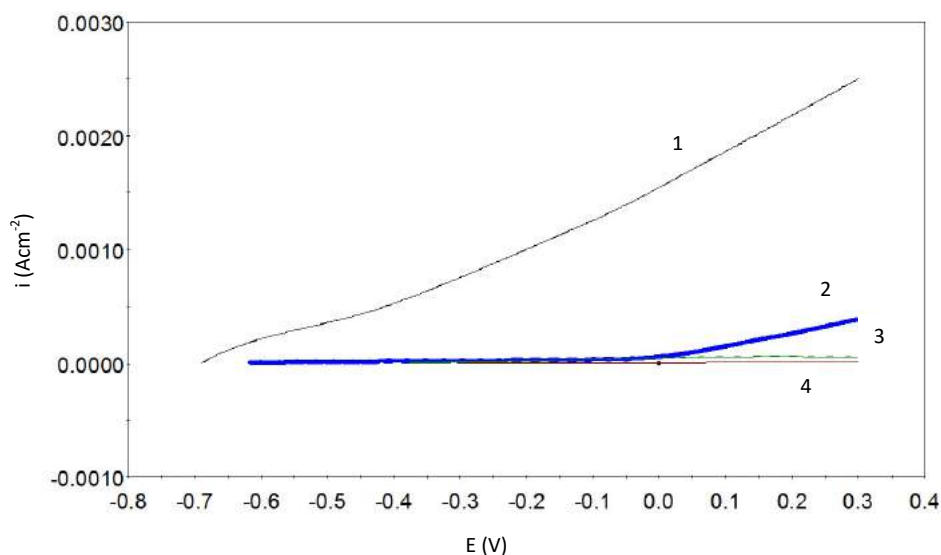


Slika 4. Anodne polarizacijske krivulje uzoraka tretiranih u otopini 5% $MgSO_4$.
1- $v/c = 0,7$; 2 - $v/c = 0,5$



Slika 5. Anodne polarizacijske krivulje uzoraka tretiranih u otopini 5% $MgCl_2 + 5\% MgSO_4$
1 - $v/c = 0,7$; 2 - $v/c = 0,5$

Kako je u uvodnom dijelu i navedeno, poroznost betona raste s porastom vodocementnog faktora. Na taj način dolazi do bržeg obaranja pH vrijednosti betona prema reakcijama 1 i 2 što dovodi do mogućnosti depolarizacije čelične armature u betonu. Depolarizaciju armature dodatno će ubrzati i hloridi koji sada lakše difundiraju do površine armature i narušavaju njen pasivni sloj. Dokaz navedenim tvrdnjama je slika 6 sa koje se vidi da je brzina korozije na čeličnoj armaturi u betonu najveća za uzorak koji je tretiran u otopini sa zajedničkim solima 5% $MgCl_2 + 5\% MgSO_4$ a da je najmanja na uzorku tretiranom u 5% $MgSO_4$. Naime, obje soli po reakcijama 1 i 2 dovode do smanjenja pH, što dovodi do depolarizacije armature, dok hloridi iz $MgCl_2$ dodatno vrše depolarizaciju armature reagujući s zaštitnim slojevima na armaturi i narušavajući ih.



Slika 6. Anodne polarizacijske krivulje uzoraka tretiranih u otopinama: 1 - 5% $MgCl_2$ + 5% $MgSO_4$, 2 - 5% $MgCl_2$, 3 - 5% $MgSO_4$, 4 - H_2O , $v/c = 0,7$

Kako je već navedeno korozija betona određivana je ispitivanjem pritisne čvrstoće navedenih uzoraka prema normi EN 12390-3. Rezultati ispitivanja pritisne čvrstoće prizmatičnih uzoraka prema normi EN 12390-3 prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati ispitivanja pritisne čvrstoće prema normi EN 12390-3

Otopine	Pritisna čvrstoća, MPa pri $v/c=0,5$	Pritisna čvrstoća, MPa pri $v/c=0,7$	Srednja vrijednost pritisne čvrstoće, MPa	
			$v/c=0,5$	$v/c=0,7$
5% $MgCl_2$	56,76	25,10	52,19	26,355
	47,62	27,61		
5% $MgSO_4$	54,71	43,57	61,17	42,105
	67,63	40,64		
5% $MgCl_2$ + 5% $MgSO_4$	55,25	23,46	57,10	23,940
	58,95	24,42		

Rezultati navedeni u tabeli 3 nedvojbeno pokazuju da i brzina korozije betona raste s povećanjem vodocementnog faktora. U svim otopinama pritisna čvrstoća uzoraka je manja za uzorke pripremane uz $v/c = 0,7$. Kod $v/c = 0,7$ najmanju pritisnu čvrstoću pokazuju uzorci tretirani u otopini sa zajedničkim solima 5% $MgCl_2$ + 5% $MgSO_4$, a najveću pritisnu čvrstoću pokazuju uzorci tretirani u otopini 5% $MgSO_4$. Pri dejstvu otopine magnezij-hlorida velikih koncentracija na beton, difuzija kalcijum-hidroksida iz unutrašnjih slojeva betona je nedovoljna za neutralizaciju $MgCl_2$, koji se kreće iz vodene sredine prema površini betona i difunduje dalje u dubinu betona, kroz opnu magnezij-hidroksida. Na tom putu, agresivna otopina ne nailazeći na prepreke, dolazi u kontakt sa hidrosilikatom i drugim hidratima iz

cementnog kamena, razara ih i prevodi u rastresitu nevezanu masu [1]. To bi mogao biti glavni razlog značajnog smanjenja pritisne čvrstoće uzoraka tretiranih u otopini 5% MgCl₂ kao i u otopini 5% MgCl₂ + 5% MgSO₄, pogotovo za uzorke pripremane uz v/c = 0,7. Korozija betona se mogla i vizuelno utvrditi jer su se nakon mjerenja pritisne čvrstoće uzorci tretirani u otopinama 5% MgCl₂ i 5% MgCl₂ + 5% MgSO₄ značajno degradirali.

4. ZAKLJUČAK

Ispitivanjem uticaja vodocementnog faktora na brzinu korozije betona i čelične armature u betonu uzrokovane solima magnezija dokazano je da brzina korozije i betona i čelične armature raste s povećanjem v/c. Naime, s porastom vodocementnog faktora raste i poroznost betona, čime agensi korozije betona i čelične armature lakše prodiru u beton, samim tim i do površine čelične armature. Hloridi i sulfati magnezija osim što snižavaju pH u porama betona, reagujući s Ca(OH)₂, reaguju i sa hidrosilikatom, hidroaluminatom, i drugim hidratima iz cementnog kamena, pogotovo hloridi. Na taj način dolazi do razaranja hidrata cementnog kamena. Posljedica navedenog je da uzorci tretirani u otopini 5% MgCl₂ kao i u otopini 5% MgCl₂ + 5% MgSO₄ pokazuju značajno smanjenje pritisne čvrstoće. Sve navedeno direktno se odražava i na povećanje brzine korozije na čeličnoj armaturi što je i dokazano.

ZAHVALA

Autori zahvaljuju Ministarstvu obrazovanja i nauke Federacije Bosne i Hercegovine, koje je u 2015. godini finansiralo istraživanja provedena u ovom radu putem naučnoistraživačkog projekta naslova: „Istraživanje korozije betona i čelične armature u betonu pod uticajem magnezijevih soli“.

5. LITERATURA

- [1] Mladenović S., Pavlović M., Stanojević D.: Korozija i zaštita betona i armiranog betona, SISZAM, Beograd, 2008.,
- [2] Talbot D., Talbot J.: Corrosion science and technology, CRC Press LLC, Florida, USA, 1998.,
- [3] Đureković, A.: Cement, cementni kompozit i dodaci za beton, IGH-Školska knjiga, Zagreb, 1996.,
- [4] Standard: HRN U.M1.044, Dodaci Betonu, Ispitivanje uticaja dodataka na koroziju armature, 1982.,
- [5] Bikić F., Rizvanović M., Cacan M.: Utjecaj klase portland-cementa na brzinu korozije čelične armature u cementnom mortu uzrokovane prodiranjem klorida i sulfata iz okoline Kem. Ind. 62 (1-2) 1–5 (2013).