

POLİAKRİLAMİD-NANO MAQNƏTİT HİSSƏCİKLƏRİ İLƏ DOLDURULMUŞ BETON KOMPOZİTİN ELEKTROKİMYƏVİ İMPEDANS TƏDQIQI

Şamə Tapdıqov¹, Ayaz Gülləyev², Samirə Məmmədova³, Cəmilə Quliyeva⁴
Səadət Hümbətova⁵, Sevda Kazımova⁶

^{1,6} SOCAR Neftqazəlmətdəqiqatlayihə İnstitutu, Azərbaycan, Bakı

² Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi, Azərbaycan, Bakı

^{3,4,5} ARETN, akad. M.Nağıyev ad. Kataliz və Qeyri-üzvi Kimya İnstitutu, Azərbaycan, Bakı

¹ shamo.chem.az@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4235-3333>

ABSTRACT

Təqdim olunan məqalədə 0.5 su/semənt əmilində Portland seməntinin su ilə qarışığından beton nümunələri hazırlanmışdır. Hansı ki, həmin beton nümunələri tərkibində seməntin 1-2%-i qədər poliakrilamid (PAA) ilə stabilləşdirilmiş maqnetit nanohissəcikləri saxlayır. 28 günlük sərtləşmiş betonların elektrik impedans spektroskopiyaya üsulu ilə müqavimət dəyərləndirilməsi aparılmışdır. Göstərilmişdir ki, PAA maqnetit nanohissəcikləri ilə kimyəvi elektrostatik əlaqədə olmaqla fiziki strukturunu qoruyub saxlayır və seməntdəki kalsium və alüminium silikatlarla qarşılıqlı əlaqədədir. Elektrokimyəvi impedans spektroskopiyasının nəticələrinə görə isə PAA/Fe₃O₄-lü beton nümunələrinin müqavimət qiymətləri kontrol və PAA/beton ilə müqayisədə xeyli fəqlənir. PAA-in betona əlavə edilməsi müxtəlif gərginlik qiymətlərindəki müqavimət göstəricilərinin yaxınlaşmasına və 2×10^6 Z' qiymətindən sonra Z''-nin yüksəlməsinə gətirib çıxarmışdır. Polielektrolit olan PAA makromolekulunu semənt strukturunda immobilizə olunması hissəciklərin uzun məsafədə əlaqələnməsini və onlar arasından keçiriciliyi təmin etmişdir. Belə ki, beton strukturuna PAA-li maqnetit nanohissəciklərinin daxil olması hidratasiya prosesinə təsir etməməklə vaxtında bərkləşməni təmin edir. Eləcə də, sonrakı dövrlərdə PAA hesabına maqnetit nanohissəciklərinin ölçüsünün stabil qalması elektrik müqavimət qiymətlərinin artmasına gətirib çıxarır.

Keywords: Portland semənt, beton, impedans spektroskopiyaya, maqnetit, nanohissəciklər, poliakrilamid.

Giriş

Məlumdur ki, beton konstruksiyalarının çöl şəraitində aqressiv təsirlərə qarşı davamlılığını gücləndirmək üçün tərkibə polimer və metal nanohissəciklər əlavə edilir [1]. Əlavə edilmiş komponentlərin betonda kimyəvi aktivliyi və funksiyası seməntin hidratasiyası zamanı müəyyən edilir. Hidratlaşma zamanı polimer və metal nanohissəciklərin strukturda paylanması və məsələləri zəbt etmə dərəcəsi sonda betonun deqradasiya və davamlılıq performansına təsir edir. Digər tərəfdən dəmir armaturlu betonlardan dayaq məqsədli istifadə zamanı korroziyanın dəyərləndirilməsi mühümdür. Belə ki, istər armaturlu, istərsə də maqnetit nanohissəcikli betonda korroziya hidratlaşma prosesindən başlayır və birbaşa xassələrə təsir edir. Məlumdur ki, korroziya elektrokimyəvi proses olmaqla ilkin hidratlaşma və sonradan betonun müxtəlif minerallı sular,

qazlar və elektrolitlər nüfuzu ilə getdikcə dərinləşir [2].

Arzuolunmaz kimyəvi prosesləri limitləmək üçün dəmir-betonda korroziyanın qiymətləndirilməsi üçün müxtəlif fiziki-kimyəvi üsullar və cihazlardan istifadə edilə bilər [3]. Belə üsullar arasında elektrokimyəvi impedans spektroskopiyası (EİS) müxtəlif elektrokimyəvi sistemləri xarakterizə etmək və bu sistemlərdə elektrolitik proseslərin təbiətini müəyyən etmək üçün güclü bir texnikadır. Digər tərəfdən sementə üzvi yaxud qeyri-üzvi maddə əlavə edilirsə hidratasiya zamanı pozzolan effektinin qiymətləndirilməsi üçün EİS-nin tətbiqi daha məqsədəuyğundur [4,5].

Belə əlavələr arasında maqnetit nanohissəciklərin sementə əlavəsi son illər əhəmiyyətli texnoloji irəliləyişlərə səbəb olmuşdur. Meral O. və başqaları [6] sement tozuna 0,5-1,25-2,5 % (kütlə/kütlə) nano Fe_2O_3 (60 nm) və nano Al_2O_3 (13 nm), eləcə də onların binar formalarını əlavə etməklə betonun sıxılmaya davamlılığının 31-32 MPa-dan, 180 gündən sonra 63-65 MPa qədər artdığını müəyyən etmişlər. Müəlliflər [7] ölçüsü $5\mu\text{m}$ -dən kiçik olan 3% Fe_3O_4 nanohissəcikləri əlavə edilmiş betonun su absorbsiya qabiliyyətini dəyişdirdiyini, mikrostrukturları yaxşı kristallaşdırdığını, və nanohissəciklərin sement hissələri ilə əlaqəli coherent kompaktlaşdığını müəyyən etmişdirlər. Maqnetit (Fe_3O_4) nanohissəcikləri asan əldə olunması, geniş xammal, ekoloji təmizlik, elektrokimyəvi aktivlik, yaxşı keçiricilik ($10^2-10^3 \Omega^{-1} \text{sm}^{-1}$) və yüksək nəzəri tutuma (1,2 V-da təxminən 347 F/q) malik olmaqla yüksək enerji sıxlıqlı materialların hazırlanmasında istifadə edilir [8].

Bu sahədə aparılan tədqiqatlardan maqnetit nanohissəcikləri ilə hazırlanmış sement pastasının yaxud sərtləşmiş betonun EİS tədqiqi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Belə ki, maqnetit nanohissəcikli betonların tətbiqi hazırda daha çox aktualdır və EİS təhlillər əksər araşdırmalarda maqnetit nanohissəcikli betonlarda aparılmışdır. Məlumdur ki, əgər başqa bir üzvi molekul kimyəvi stabilləşmə (protektə) yoxdursa metal nanohissəciklər uzun müddət ölçülərini stabil saxlaya bilmirlər. Bu səbəbdən sement pastasının hazırlanması zamanı polimer əsaslı Fe_3O_4 nanohissəciklərindən istifadə etməklə betonun EİS tədqiqi maraqlı nəticələrə gətirib çıxarar.

Sintetik polimerlər arasında poliakrilamid (PAA) neft sənayesində, filiz çıxarılmasında, suyun və tullantı çirkablarının təmizlənməsində, müxtəlif sənaye və istehlak məhsullarında qatılaşdırıcı və flokulyant kimi geniş istifadə olunur [9]. Tərkibində müxtəlif polimerlər və metal-oksit nanohissəciklərinin olduğu beton/polimer yaxud nh/beton strukturlarının EİS tədqiqatlarına rast gəlmək mümkündür. Lakin sement pastasından polimer-nh-beton formalarının hazırlanması və mikroquruluş, mexaniki və EİS xarakterizə olunması işlərinə çətin rast gəlinir.

Qeyd olunanları nəzərə alaraq təqdim olunan məqalədə müxtəlif miqdar aşağı orta molekul kütləli hidrofily anionit poliakrilamid ilə stabilləşdirilmiş maqnetit nanohissəcikli beton nümunələri hazırlanmışdır. Əldə edilmiş betonların 28 günlük sərtləşməsindən sonra EİS ilə xarakterizasiyası aparılmışdır.

Təcrübi hissə

Reagentlər

Beton hazırlanmasında quyudibi zonanı bərkitmək üçün nəzərdə tutulan G markalı, Portland sementindən istifadə olunmuşdur (API Specification 10A-2011). Sementin tərkibindəki əsas kimyəvi komponentlər və bəzi vacib fiziki parametrlər cədvəl 1-də verilmişdir. İstifadə olunan poliakrilamid (PAA) kimyəvi təmiz olub Sigma-Aldrichdən satın alınmışdır. CAS 9003-05-8 olub, orta molekul kütləsi 40 kDa təşkil edir. Sintez və digər prosedurlar zamanı istifadə olunan reagentlər kimyəvi təmiz olmuşdur.

Beton tərkibləri və hazırlanması

Təcrübələr zamanı 6 fərqli beton nümunələri hazırlanmışdır. Hər birində sement pastası üçün 0.5 su/sement nisbəti təmin edilmiş və nümunələrdə PAA-in miqdarı quru sement kütləsinin 0.025%-i qədər olmuşdur. Bu məqsədlə 500 qr 1%-li PAA məhlulu hazırlanmış və sement pastaları üçün istifadə zamanı durulaşdırmalar aparılmışdır. Maqnetit nanohissəciklərin sintezi [11] metodikasına uyğun olmuş, reaksiya zamanı FeCl_3 və FeCl_2 duzları kristalhidratlar kimi istifadə olunmuşdur.

Elektrokimyəvi impedans spektroskopiyası

Elektrokimyəvi impedans spektroskopiyası Z-1500P İmpedans spektrometr cihazında ölçülmüşdür. Elektrokimyəvi impedans spektroskopik ölçmələrdə American Gamry sabit potensial potensiostat/DC sayğacından istifadə edilib, cari ölçmə diapazonu 100 mA-1 nA, cərəyan ölçmə dəqiqliyi 100 nA, giriş müqaviməti isə 1013 Ω -dan çox idi. Prosesdə sınaq tezliyi 1MHz-100GHz-dir.

Nəticələr və müzakirəsi

İlkin olaraq PAA-li maqnetit nanohissəcikləri ilə sərtləşmiş betonun bəzi fiziki-mexaniki parametrləri müəyyən edilmiş və sərbəst nümunə ilə müqayisə edilmişdir (Cədvəl 1).

Cədvəl 1. G klass tamponaj sementinin və 2% PAA/ Fe_3O_4 ilə doldurulmuş betonun bəzi fiziki-mexaniki xassələrinin müqayisəli qiymətləri. C3S –trikalsium silikat, C3A-trikalsium alüminat, C4AF-tetra kalsium Alüminium ferrit, C2S-dikalsium silikat

Birləşmələr, (%) -lə				Fiziki xassələri, 0.5 su/sement		
Portland sementi		2% PAA/ Fe_3O_4 ilə doldurulmuş beton		Parametrlər	Hidratlaşmış Portland sementi	2% PAA/ Fe_3O_4 -li beton
CaO	62.4	CaO	60.57	ρ , qr/sm ³	3.17	3.24
SiO ₂	20.7	SiO ₂	19.26	s , sm ² /qr	4765	4681
Al ₂ O ₃	5.2	Al ₂ O ₃	4.9	n , dəq	İlkin 147 Son 238	İlkin 151 Son 243
MgO	≤1.24	MgO	≤1.08	sd , 28 gün ad 28 gün	49.3 MPa 11.58 MPa	54.7 MPa 12.83 MPa
Fe ₂ O ₃	4.3	Fe ₂ O ₃	4.7	r p	20.50 sm	21.31 sm
C3S	59.2	C3S	57.4		0.495	0.437
C3A	2.18	C3A	2.03	E 10 saat, s/m,	0.43	0.52
C4AF	16.75	C4AF	17.85			
C2S	9.16	C2S	8.81			

ρ – sıxlıq, s - Xüsusi səth sahəsi, n - Tutuşma nöqtəsi, sd - Sıxılmaya davamlılıq, ad - Əyilməyə davamlılıq, r - Yayılması, p - Məsəməliyi (10.3 MPa və 40 °C-də), E - Elektrik keçiriciliyi.

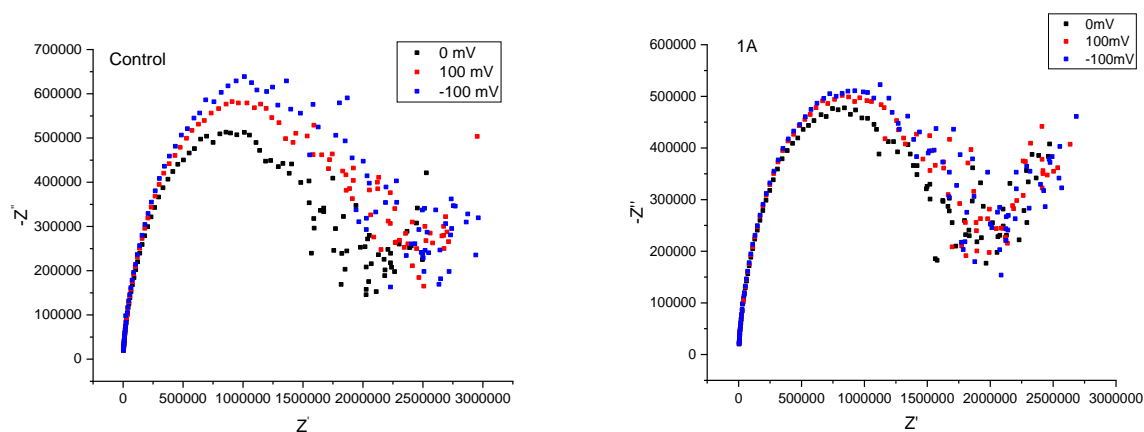
Göründüyü kimi tərkibə 2% miqdarında PAA/ Fe_3O_4 nano komponentin əlavə edilməsi sonda betonun həm mexaniki, həm elektrik, həm də tərkibdəki birləşmələrin ümumi payına təsir edir. Aydın ki, keçirici maqnetit nanohissəciklərin və zəif polielektrolitin polimerin strukturunda immobilizə olunması betonun elektrik keçiriciliyini cüzi də olsa artırır. Polimer zəncirlərinin və nanohissəciklərin beton boşluqlarında yerləşməsi sonda onun məsəməliliyinin azalmasına, sıxılmaya davamlılıq göstəricisinin isə 10.95% artmasına səbəb olmuşdur. PAA makromolekullarının, eləcə də digər polimer tiplərinin və maqnetit nanohissəciklərinin betonun mexaniki xassələrinin dəyişdirilməsinin fiziki-kimyəvi izahı [10,11] işlərimizdə ətraflı izah

edilmişdir.

Qeyd olunduğu kimi elektrokimyəvi üsullar, o cümlədən elektrokimyəvi impedans spektroskopiyası dəmir-betonda korroziyanın qiymətləndirilməsi və öyrənilməsi üçün istifadə olunan ən çox yayılmış üsullardan biridir. Hazırladığımız nümunələr aşağıdakı kimi kodlaşdırılmışdır:

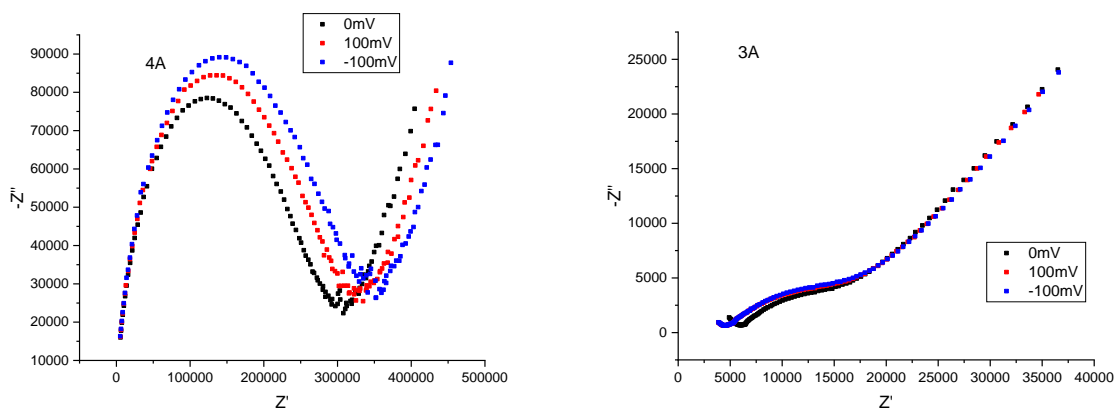
Kontrol – tərkibində polimer və nanohissəcik olmayan beton;

1A- 0.025% (k/k) PAA; **3A**- 1% (k/k) PAA - Fe_3O_4 ; **4A** – 0.025% (k/k) PAA, hər birindən 0.2% (k/k) $FeCl_3$ və $FeCl_2$; **5A** - 2% (k/k) PAA - Fe_3O_4 ; **12B** - 0.1% (k/k) $FeCl_2$ və $FeCl_3$ duzları əlavə edilmiş beton nümunəsi. İlkin olaraq qatqsız sement pastası və 1% PAA əlavə edilmiş sement məhlulunun tam sərtləşməsindən sonrakı betonların elektrik impedans spektrləri təhlil edilmişdir (Şəkil 1).



Şəkil 1. Kontrol beton nümunəsi və 0.025% (kütlə) PAA doldurulmuş betonun 28 günlük sərtləşmədən sonra elektrik impedans spektri. Su/sement amili 0.5. Z' - ReZ Ohm, Z'' - $(-ImZ)$, Ohm.

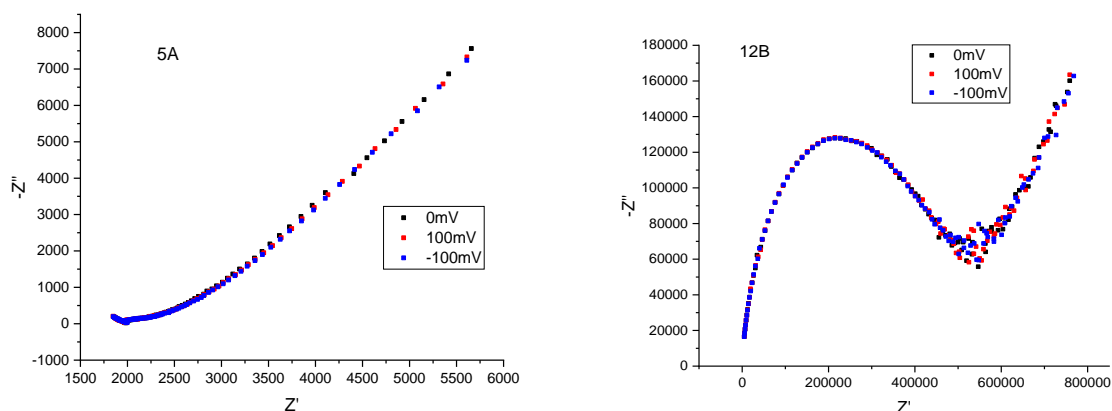
Şəkiləki nöqtələrin vəziyyətindən görüldüyü kimi PAA-in betona əlavə edilməsi müxtəlif gərginlik qiymətlərindəki müqavimət göstəricilərinin yaxınlaşmasına və $2 \times 10^6 Z'$ qiymətindən sonra Z'' -nin yüksəlməsinə gətirib çıxarır. Polielektrolit olan PAA makromolekulunu sement strukturunda immobilizə olunması hissəciklərin uzun məsafədə əlaqələnməsini və onlar arasından keçiriciliyi təmin edir. Həmçinin müqavimət nöqtələrinin yaxın məsafədə nizamlanması beton-dakı kalsium və alüminosilikatların PAA zəncirləri boşluğunda strukturlaşdırdığını sübut edir.



Şəkil 2. 1% (kütlə) PAA - Fe₃O₄ (3A) maqnetit nanohissəciyi və 0.025% (kütlə) PAA-li 0.2% (kütlə) FeCl₃/FeCl₂ (4A) duzları ilə sərtləşmiş betonun elektrik impedans spektri. Su/şement amili 0.5, sərtləşmə 28 günlük. Z' - ReZ Ohm, Z'' - (-ImZ), Ohm.

Beton tərkibinə PAA-in dəmir duzları ilə kompleksinin əlavə edilməsi onun həm mexaniki xassələri, həm də elektrik impedans spektrinə təsir edir. Dəmir duzlarının PAA və silikatlarla müqayisədə üstün elektrolit xassəsinə malik olması onun elektrik müqavimətinə kəskin təsir edir (Şəkil 2-4A).

Təcrübələr zamanı betonun elektrik müqavimətinə maqnetit nanohissəciklərinin təsiri PAA olmadan adi duzlar iştirakı ilə də müqayisə edilmişdir (Şəkil 3, 5A və 12B).



Şəkil 3. 2% (kütlə) PAA - Fe₃O₄ maqnetit nanohissəciyi və 0.1% (kütlə) FeCl₃/FeCl₂ duzları ilə sərtləşmiş betonun 28 gündən sonra elektrik impedans spektri. Su/şement amili 0.5. Z' - ReZ Ohm, Z'' - (-ImZ), Ohm.

Göründüyü kimi dəmir duzları iştirakında müxtəlif tezlik göstəricilərində müqavimət dəyişikliyi düzxətti asılılıq verir. Bu tərkibin elektrolit komponentlərindən ibarət olması ilə əlaqədardır. Beton kompozitdə maqnetit nanohissəciklərin olması nümunənin EİS müəyyən qiymətə qədər artım, daha sonra isə azalıb-artma tendensiyası ilə davam edir. Strukturda maqnetit nanohissəcikləri ilə yanaşı müəyyən miqdar elektrolit hissəciklərinin olması EİS spektrinin təbiətini bu formada olmasına gətirib çıxarır. Əldə olunmuş EİS nəticələrinə əsasən maqnetit nanohissəcikli beton nümunələrindən elektriko həssas keçirici beton nümunələri yaxud betonda korroziya prosesinin elektrokimyəvi təbiətini, baş verməsini kinetik olaraq dəyərləndirmək olar.

Acknowledgment

This work was supported by the Azerbaijan Science Foundation – Grant No AEF-MCG-2022-1(42)-12/05/2-M-05.

References

1. Sh.Z. Tapdigov, F.F.Ahmad, N.N. Hamidov, E.E. Bayramov. Increase in the Efficiency of Water Shut-off with the Application of Polyethylenpolyamine added Cement. Chemical Problems, 2022, V.20. p.59-67.

-
- Elyson A.P. Liberati, Caio G. Nogueira, Edson D. Leonel, Alaa Chateauf.: Chapter 5 - Failure analysis of reinforced concrete structures subjected to chloride penetration and reinforcements corrosion, Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries, Butterworth-Heinemann, pp. 93-121, 2016.
 - Piotr W., Paweł Ł., Elżbieta S., Grzegorz A., Karol C., Szymon S.: Concrete corrosion in a wastewater treatment plant – A comprehensive case study, Construction and Building Materials, vol-303, pp. 124388, 2021.
 - Dineshkumar R., Naveenkumar R., Sudharsan P., Kavin P and Mohanaprasath G.: Corrosion Assessment Methods in Reinforced Cement Concrete. E3S Web Conf., vol 03002, pp. 399,(2023).DOI:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339903002>.
 - Cruz J.M., Fita I.C., Soriano L., Payá J., Borrachero M.V.: The use of electrical impedance spectroscopy for monitoring the hydration products of Portland cement mortars with high percentage of pozzolans. Cement and Concrete Research, vol- 50, pp. 51-61, (2013).
 - Meral O., Remzi Ş.: Effect of nano SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash. A comparative study. Energy and Building, vol-58, pp. 292-301, (2013).
 - Ślosarczyk A., Kwiecińska A., Pełszyk E.: Influence of Selected Metal Oxides in Micro and Nanoscale on the Mechanical and Physical Properties of the Cement Mortars. Procedia Engineering, vol 172, pp. 1031-1038, (2017).
 - Cornell R.M., Schwertmann U.: The Iron Oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2003. ISBN 978-3-527-30274-1.
 - Thomas L.S., Pronoy K.C.: Chapter VIII-Synthetic Superabsorbents, Editor(s): P.K. Chatterjee, B.S. Gupta, Textile Science and Technology, Elsevier, vol 13, pp. 283-322, (2002).
 - Shamo Z.T., Elvin Y.M., Fariz F.Ah., Sevda Sh.K., Ayaz M.G., Samire M.M., Seadat F.H., Jamila E.G.: The physical-mechanical behavior and chemical bonding nature of poly-N-vinylpyrrolidone modified cement concrete. Heliyon, 2024, Volume 10, Iss.4, e26039.
 - Humbatova S.F., Tapdiqov Sh.Z., Guliyeva J.E., Gulamirov A.M., Mammadova S.M., Fariz A.A., Kazimova S.Sh.: Poliakrilamid/Fe₃O₄ Maqnetit Nanohissəcikli Beton Daşinin Xəzər Dənizi Və Lay Suyunda Kütlə Qradiyentinin Tədqiqi, Chemical Problem, 2024, V.22 No1, p.52.

ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE STUDY OF CONCRETE COMPOSITE FILLED WITH POLYACRYLAMIDE-NANO MAGNETITE PARTICLES

**Shamo Tapdigov¹, Ayaz Gulaliyev², Samira Mammadova³, Jamila Guliyeva⁴
Saadat Humbatova⁵, Sevda Kazimova⁶**

^{1,6} SOCAR Oil and Gas Research and Project Institute, Azerbaijan, Baku

² National Nuclear Research Center, Azerbaijan, Baku

^{3,4,5} ARETN, acad. Name of M. Nagiyev. Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry, Azerbaijan, Baku

¹ shamo.chem.az@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4235-3333>

ABSTRACT

In the presented article, concrete samples were prepared from a mixture of Portland cement with water at a water/cement factor of 0.5. Which concrete samples contain magnetite nanoparticles stabilized with polyacrylamide (PAA) as much as 1-2% of cement. The resistance of 28-day-hardened concrete was evaluated by the method of electrical impedance spectroscopy. It has been shown that PAA retains its physical structure by chemical electrostatic bonding with magnetite nanoparticles and interacts with calcium and aluminum silicates in cement. According to the results of electrochemical impedance spectroscopy, the resistance values of concrete samples with PAA/Fe₃O₄ are significantly different compared to control and PAA/concrete. The addition of PAA to concrete led to the approximation of the resistance indicators at different stress values and the increase of Z'' after the value of $2 \times 10^6 Z'$. Immobilization of PAA macromolecule, which is a polyelectrolyte, in the cement structure ensured long-distance connection of particles and permeability between them. Thus, the inclusion of PAA-containing magnetite nanoparticles in the concrete structure ensures timely hardening without affecting the hydration process. Also, the stable size of magnetite nanoparticles due to PAA in later periods leads to an increase in electrical resistance values.

Keywords: Portland cement, concrete, impedance spectroscopy, magnetite, nanoparticles, polyacrylamide.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ИМПЕДАНСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕТОННОГО КОМПОЗИТА, НАПОЛНЕННОГО ПОЛИАКРИЛАМИД-НАНО МАГНЕТИТОВЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Шамо Тапдигов¹, Аяз Гюльалиев², Самира Мамедова³, Джамиля Гулиева⁴
Саадат Гумбатова⁵, Севда Кязимова⁶

^{1,6} SOCAR Научно-Исследовательский и Проектный Институт Нефти и Газа, Азербайджан, Баку

² Национальный Центр Ядерных Исследований, Азербайджан, Баку

^{3,4,5} АРЭТН, акад. Имя М. Нагиева. Институт Катализа и Неорганической Химии, Азербайджан, Баку

¹ shamo.chem.az@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4235-3333>

РЕЗЮМЕ

В представленной статье образцы бетона были приготовлены из смеси портландцемента с водой при водоцементном коэффициенте 0,5. Какие образцы бетона содержат наночастицы магнетита, стабилизированные полиакриламидом (ПАА), в количестве 1-2% от цемента. Сопротивление бетона, затвердевшего 28 суток, оценивалось методом электроимпедансной спектроскопии. Показано, что ПАА сохраняет свою физическую структуру за счет химической электростатической связи с наночастицами магнетита и взаимодействует с силикатами кальция и алюминия в цементе. По результатам электрохимической импедансной спектроскопии значения сопротивления образцов бетона с ПАК/Fe₃O₄ существенно отличаются по сравнению с контролем и ПАК/бетон. Добавление ПАК в бетон привело к сближению показателей сопротивления при различных значениях напряжений и увеличению Z'' после значения $2 \times 10^6 Z'$. Имобилизация макромолекулы

ПАК, являющейся полиэлектролитом, в структуре цемента обеспечивала дальнюю связь частиц и проницаемость между ними. Таким образом, включение в структуру бетона наночастиц магнетита, содержащих ПАК, обеспечивает своевременное затвердевание, не влияя на процесс гидратации. Также стабильный размер наночастиц магнетита за счет ПАК в более поздние периоды приводит к увеличению значений электрического сопротивления.

Ключевые слова: портландцемент, бетон, импедансная спектроскопия, магнетит, наночастицы, полиакриламид.