

*Elżbieta Horszcharuk  
Ewa Mijowska  
Paweł Sikora  
Krzysztof Cendrowski*

# **Mikrostruktura i właściwości mechaniczne kompozytów cementowych zawierających nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENTITIOUS COMPOSITIES INCORPORATING NANO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

## **Streszczenie**

W ostatnich latach wzrosło gwałtownie zainteresowanie zastosowaniem nanocząstek w materiałach budowlanych w celu uzyskania wyjątkowych właściwości, których nie mają te materiały w wersji „tradycyjnej”. Najwięcej badań nad zastosowaniem nanocząstek w kompozytach cementowych przeprowadzono z zastosowaniem nano-TiO<sub>2</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz nano-SiO<sub>2</sub>. Nanocząstki magnetytu wykazują wiele interesujących i wyjątkowych właściwości. Stosowano je w różnych dziedzinach. Magnetyczne nanocząstki zbudowane z magnetytu (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) są wykorzystywane m. in. w katalizie, magnetoptyce, hipotermii, systemach dostarczania leków, obrazowaniu metodą rezonansu magnetycznego (MRI), diagnostyce medycznej i leczeniu raka.

W pracy przedstawiono wyniki badań podstawowych dotyczące wpływu dodatku nanomagnetytu na właściwości mechaniczne i strukturę zapraw cementowych. Zaprawy cementowe modyfikowano domieszką nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> w ilości: 1, 2, 3, 4 i 5% masy cementu. Stwierdzono, że obecność nanomagnetytu nie ma wpływu na główne produkty hydratacji oraz szybkość procesu. Ponadto, zastosowanie nanomagnetytu przyczynia się do poprawy wytrzymałości na ściskanie. Zaobserwowano, że ze względu na wysoką energię powierzchniową nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> cząstki mają tendencję do aglomeracji, co może prowadzić do mikropęknięć i pogorszenia wytrzymałości w przypadku dużej zawartości nanododatku.

---

*dr hab. inż. Elżbieta Horszcharuk, prof. ZUT – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
prof. dr hab. Ewa Mijowska – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
mgr inż. Paweł Sikora – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
dr inż. Krzysztof Cendrowski – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie*

## **Abstract**

In the last decade nanotechnology has gathered spectacular attention in the field of building materials in order to obtain composite exhibiting unique properties while compared to “ordinary” composite. The most popular nanomaterials used in modifying cement-based materials are nano-TiO<sub>2</sub>, nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Nanomagnetite particles exhibit interesting properties and can find their application in catalysis, magneto-optics, hyperthermia, drug carrier systems, magnetic resonance imaging (MRI), medical diagnosis and cancer therapy. In this work, the effect of nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> as an admixture (from 1% to 5% by mass of the cement) on the mechanical and microstructural properties of cement mortars has been characterized. Study has shown that the presence of nanomagnetite does not affected the main hydration products and the rate of cement hydration. Moreover, application of nanomagnetite contributed to compressive strength improvement. It was observed that due to high surface energy of iron oxides, particles have tendency towards agglomeration which might lead to microcracking and strength deterioration while high amount of nanoparticles is applied.

## 1. Wprowadzenie

Beton jest jednym z najbardziej popularnych i względnie tanich materiałów służących do ochrony przed radiacją w infrastrukturze medycznej, obiektach zawierających źródła promieniowania i aparaturę promieniotwórczą. W porównaniu do innych materiałów konstrukcyjnych beton ma wysoką zdolność ochrony przed promieniowaniem, dobrą trwałość i jest łatwiejszy w produkcji, w porównaniu do ołowianych bloków lub innych materiałów chroniących przed neutronami. Współczesne betony osłonowe zawierają różnorodne dodatki i domieszki, które pozwalają zmniejszyć ilość cementu pozwalając na ostateczną redukcję kosztów produkcji [23]. W celu zapewnienia ochrony przed neutronami beton musi zawierać pierwiastki ciężkie, które umożliwiają spowolnienie szybkich neutronów oraz odpowiednią ilość wodoru pozwalającą na spowolnienie neutronów średnich i zaabsorbowanie neutronów wolnych. Prawdopodobieństwo wystąpienia interakcji promieni gamma zależy od energii fotonu, liczby atomowej oraz gęstości materiału osłonowego, zatem do poprawy właściwości osłonowych betonów cementowych zalecane jest stosowanie kruszywa ciężkiego, zawierającego fazy metaliczne, takiego jak: magnetyt, hematyt czy goethyt [9]. Wpływ rodzaju kruszywa na właściwości osłonowe był badany przez wielu naukowców [6, 8, 15].

Aktualne badania z zakresu technologii betonu dotyczące projektowania osłon betonowych przed promieniowaniem jonizującym, skupiają się na poprawie struktury betonu (zagęszczenie) oraz modyfikacji mikrostruktury poprzez zastosowanie różnych domieszek i dodatków [23]. Zastosowanie takich domieszek jak pył krzemionkowy [9] czy ołów [19] wzbudziło duże zainteresowanie w ostatnich latach. Badania prowadzone przez naukowców pokazują, że zastosowanie domieszek i dodatków przyczynia się do poprawy mikrostruktury oraz zwiększenia gęstości betonu, co w konsekwencji może prowadzić do poprawy właściwości osłonowych.

Gwałtowny rozwój nanotechnologii oraz coraz większa dostępność nowych nanomateriałów pozwoliła na zastosowanie ich w wielu dziedzinach nauki, wliczając w to nowoczesne materiały budowlane, w tym również różnego rodzaju kompozyty cementowe. Nanocząstki wykazują unikalne właściwości chemiczne i fizyczne w porównaniu do takich samych materiałów w skali makroskopowej lub mikroskopowej [11]. Zastosowanie nawet niewielkiej ilości nanomateriału pozwala znacznie wpłynąć na właściwości materiału budowlanego [3]. Wśród najbardziej znanych i obiecujących nanomateriałów stosowanych w kompozytach cementowych są nanokrzemionka [21] oraz ditlenek tytanu [5], które mają bardzo interesujące właściwości. Występuje jeszcze wiele innych nanomateriałów, których wpływ na właściwości kompozytów cementowych nie został jeszcze w pełni rozpoznany.

Jednym z kierunków badań naukowych prowadzonych w ostatnich czasach jest zastosowanie nanomateriałów do poprawy właściwości osłonowych kompozytów cementowych. Największe zainteresowanie do tego typu zastosowań znalazł ołów i tlenek. Pomimo dużej ilości badań na temat zastosowania ołowiu w betonach cementowych [18], niewielka ilość poświęcona jest wpływowi nanometrycznego ołowiu na właściwości osłonowe betonu [9, 16]. Badania wykazały, że zastosowanie nanocząstek ołowiu ma bardzo pozytywny wpływ na właściwości osłonowe przed promieniowaniem gamma. Pomimo, że nanocząstki ołowiu wydają się obiecującym i efektywnym materiałem do zastosowań osłonowych, to ekspozycja na ołów jest bardzo niebezpieczna i może powodować wiele problemów zdrowotnych. Długotrwała ekspozycja na ołów i jego sole (np. tlenek ołowiu, octan ołowiu itd.) może powodować kumulację metali ciężkich w ciele człowieka. Dlatego

podjmuje się działania w celu zastąpienia konwencjonalnych materiałów ołowianych. Badania nad materiałami mogącymi zastąpić ołów jako klasyczny materiał stosowany w osłonach radiologicznych skierowane są w stronę nanomateriałów. Zastosowanie nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  lub innych pierwiastków magnetycznych w nanokompozytach polimerych wykazało podwyższone właściwości osłonowe [11]. Nanokompozyty łączą swoje właściwości funkcjonalne nanocząstek wraz z pożądanymi właściwościami polimeru [3]. Zastosowanie kompozytu cementowego jako nośnika nanomateriałów wydaje się być bardzo efektywnym rozwiązaniem ze względu na silne właściwości wiążące zaczynu cementowego oraz zdolność do wbudowania się nanostruktur w matrycę cementową.

Jak dotąd brak informacji dotyczących wpływu nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  na właściwości osłonowe betonów, lecz badania przeprowadzone przez Cao i in. [7] na temat wpływu mikrocząstek  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  oraz  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (rozmiar cząstek poniżej 40  $\mu\text{m}$ ) na właściwości osłonowe betonów wykazały bardzo pozytywne rezultaty. W wielu pracach badawczych [10, 13, 14, 17, 22] wykazano, że zastosowanie  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  w kompozytach cementowych ma bardzo pozytywne właściwości na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne kompozytów cementowych. Ponadto sugeruje się, że zastosowanie tlenków żelaza rozproszonych równomiernie w matrycy cementowej może istotnie wpłynąć na produkcję nowoczesnych betonów ciężkich [21].

Literatura na temat zastosowania nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  w kompozytach cementowych jest bardzo ograniczona. Wyniki badań prezentowane przez naukowców wykazują, że zastosowanie nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  w małej ilości (do 0,3% względem masy cementu) może prowadzić do poprawy właściwości mechanicznych i udoskonalenia struktury porów [2, 17, 20], a co za tym idzie zmniejszenia nasiąkliwości i penetracji chlorków [1]. Badania opisane w pracy [1], przeprowadzone na zaczynach cementowych z domieszką tlenków żelaza wykazały, że w warunkach podwyższonej temperatury nanocząstki tlenku żelaza poprawiają właściwości zaczynu cementowego. Odporność termiczna betonów stosowanych w obiektach nuklearnych wraz z ochroną przed radiacją są głównymi wymaganiami stawianych betonom ciężkim.

Celem prezentowanych badań jest ocena wpływu domieszkano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  na właściwości mechaniczne i mikrostrukturalne kompozytów cementowych w aspekcie oceny możliwości implementacji nanomagnetytu w betonach specjalnych przeznaczonych do wykonywania osłon radiologicznych. W pracy przeanalizowano wpływ nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  na proces hydratacji oraz mikrostrukturę badanych zapraw cementowych.

## 2. Skład kompozytów i metodyka badań

Do badań zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1. Dodatkowo do przygotowania zapraw cementowych zastosowano drobne kruszywo kwarcowe frakcji 0/2 mm oraz wodę wodociągową. Wskaźnik wodno-cementowy ustalono na 0,5 w celu uzyskania odpowiedniej konsystencji zaprawy. W składzie zapraw nie zastosowano innych dodatków ani domieszek, celem scharakte-

Tabela 1. Skład chemiczny cementu CEM I 42,5R (% mas.)

Składnik	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	Cl <sup>-</sup>	Strata prażenia
Zawartość [%]	19,5	4,9	2,9	63,3	1,3	2,8	0,1	0,9	0,06	3,5

ryzowania wpływu nanomagnetytu na właściwości kompozytu cementowego. Składy badanych zapraw przedstawione zostały w tabeli 2.

Przed wprowadzeniem nanomateriału do suchych składników zaprawy nanomagnetyt został poddany dyspersji przez sonikację w wodzie zarobowej, w celu uzyskania jednorodnej zawiesiny materiału. W badaniach zastosowano komercyjne nanostruktury  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  firmy Sigma Aldrich (637106). Identyfikacja faz krystalicznych cząstek tlenku żelaza oraz zaczynu cementowego wykonana została za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego X-Pert Philips PRO. Próbkę do badań zaczynu cementowego pobrano po 7 i 28 dniach dojrzewania kompozytu. Do charakterystyki morfologii nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  wykorzystano transmisyjny mikroskop elektronowy o wysokiej rozdzielczości FEI Tecnai G2 F20 FE-TEM oraz skaningowy mikroskop elektronowy Hitachi SU 8000.

Tabela 2. Skład badanych zapraw cementowych modyfikowanych nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Oznaczenie próbek	Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	Woda [kg/m <sup>3</sup> ]	Piasek [kg/m <sup>3</sup> ]	Nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ [% masy cementu]
R	519	257	1546	0	0
N1	519	257	1546	5,2	1
N2	519	257	1546	10,4	2
N3	519	257	1546	15,6	3
N4	519	257	1546	20,8	4
N5	519	257	1546	26,0	5

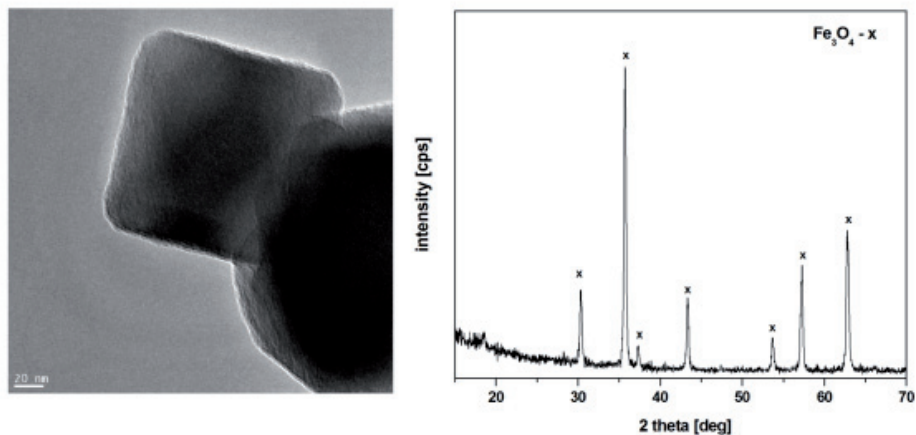
Konsystencję zapraw oznaczono metodą wg normy PN-EN 1015-3. Ze świeżej zaprawy wykonano beleczki o rozmiarach 40x40x160 mm. Po 24 godzinach dojrzewania próbki zostały rozformowane i dojrzewały w standardowej komorze klimatycznej w temperaturze 20°C ± 2°C. Po 28 dniach dojrzewania oznaczono wytrzymałość na zginanie i ściskanie próbek. Sześć beleczek na zginanie oraz 12 połówek beleczek na ściskanie zostało wykorzystanych aby obliczyć średnie wartości sił. Badanie ciepła hydratacji cementu wykonano za pomocą mikrokalorymetru różnicowego BMR, w temperaturze 22±2°C. W tym celu 25 gramów cementu wymieszanych zostało z wodą i zdyspergowaną domieszką  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , a następnie próbki zaczynu poddano badaniu przez 72 godziny.

### 3. Wyniki badań i dyskusja

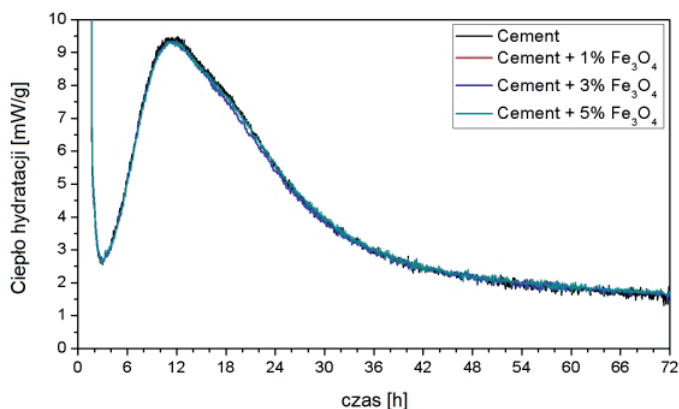
#### 3.1. Ciepło hydratacji i skład fazowy

Rysunek 1 przedstawia zdjęcie nanocząstek  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  wykonane za pomocą transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM) oraz dyfraktogram rentgenowski (XRD) nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Zdjęcie TEM wykazało, że cząstki nanomagnetytu mają sześcienną budowę i średnicę od 50 do 100 nm. Analiza XRD potwierdziła zawartość faz magnetytowych w tlenku żelaza. Krzywe szybkości wydzielania ciepła hydratacji zaczynów zawierających 0, 1, 3, 5% nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  zaprezentowano na rysunku 2. Badania przebiegu wydzielania ciepła

hydratacji wykazały, że obecność nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nie ma wpływu na przebieg procesu hydratacji w trakcie 72 godzin dojrzewania.



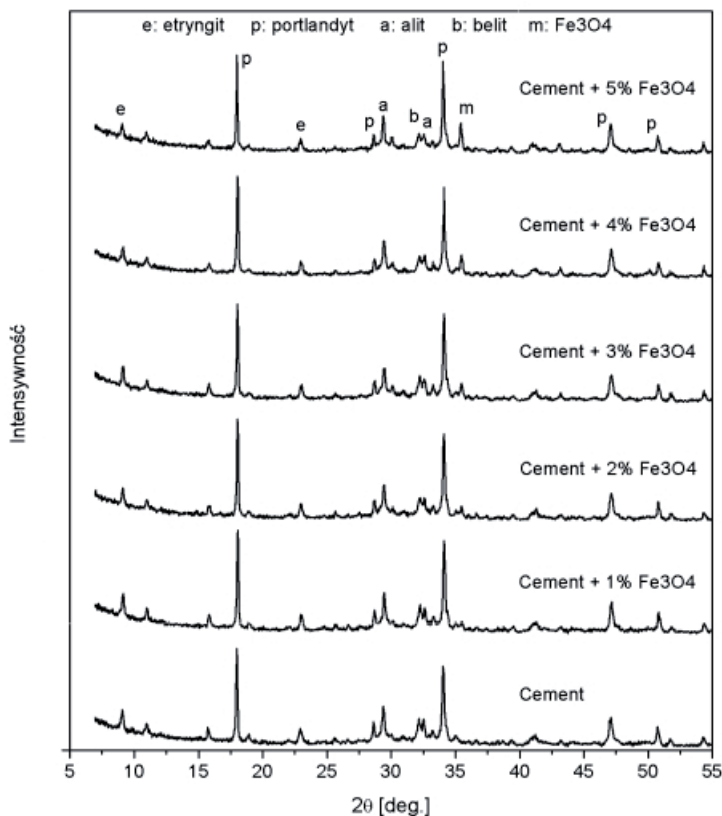
Rys. 1. Zdjęcie TEM oraz dyfraktogramy rentgenowskie (XRD) nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$



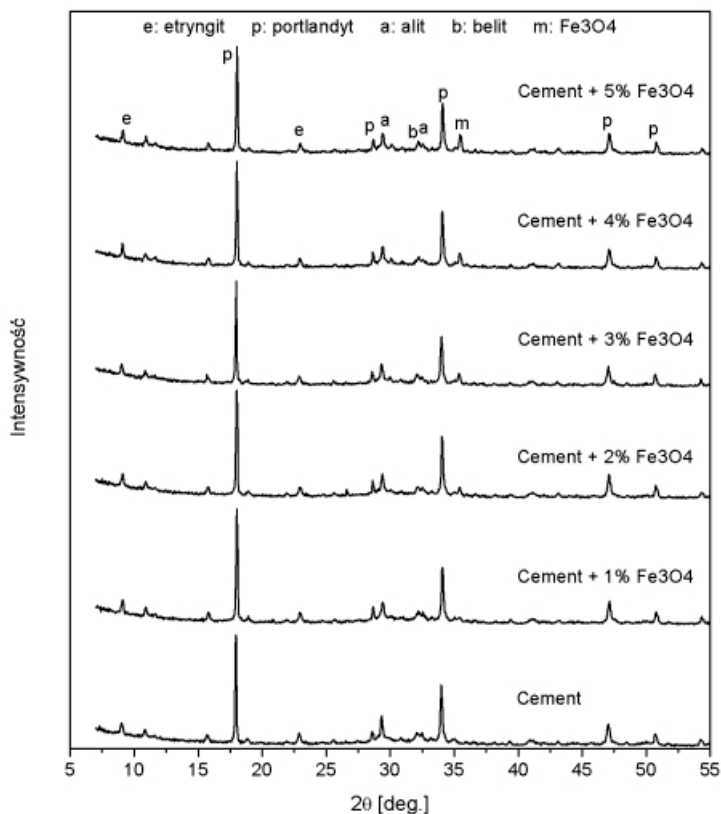
Rys. 2. Krzywe wydzielania ciepła hydratacji cementu zawierającego różną ilość domieszki nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Dyfraktogramy rentgenowskie XRD stwardniałych zaczynów cementowych z domieszką nanomagnetytu, po 7 i 28 dniach dojrzewania przedstawiono na rysunkach 3 i 4. W obu wypadkach fazami rozpoznanymi jest faza C-S-H, portlandyt (CH) oraz  $\text{CaCO}_3$ .

Ponadto, wraz ze wzrostem obecności nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pik odpowiedzialny za magnezyt wzrasta. Z analizy dyfraktogramów wynika, że obecność nanomagnezytu nie wpłynęła na główne produkty hydratacji (C-S-H i portlandyt). Obserwacje te pokrywają się z wynikami badań [2] i wykazują, że nanocząstki magnezytu nie mają istotnego wpływu na wydzielanie ciepła hydratacji, jak i na charakter produktów hydratacji.



Rys. 3. Dyfraktogram XRD dla zaczynów po 7 dniach dojrzewania



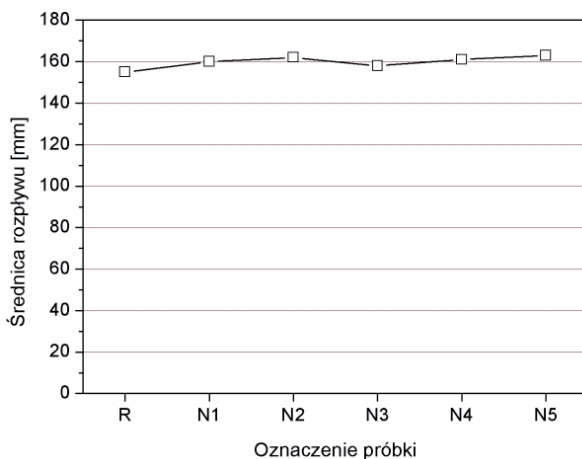
Rys. 4. Dyfraktogram XRD dla zaczynów po 28 dniach dojrzewania

### 3.2. Konsystencja zapraw cementowych

Konsystencja świeżych zapraw oznaczona została za pomocą metody stolika rozpliwowego, a wyniki zaprezentowano na rysunku 5. Obecność nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nie wpłynęła istotnie na konsystencję badanych zapraw, pomimo swojego nanometrycznego charakteru. Powiązane może być to z nieporowatą morfologią Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> [4] i bardziej hydrofobowym charakterem nanomagnetytu, w porównaniu z innymi nanomateriałami, które mają znaczny wpływ na konsystencję i pogorszenie urabialności kompozytów cementowych [21].

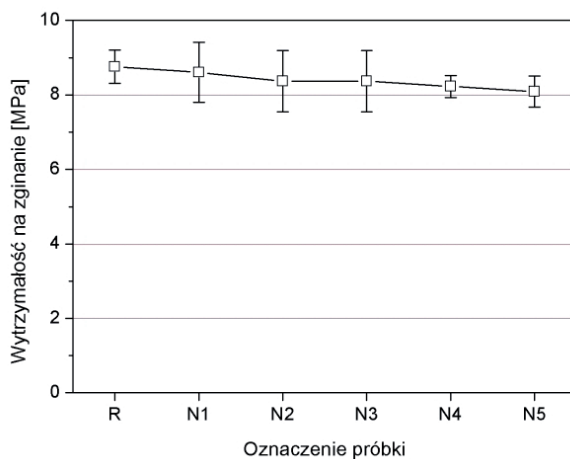
Najbardziej popularne nanomateriały stosowane w technologii betonu (m.in. nanokrzemionki oraz ditlenek tytanu) są w większości porowate i przejawiają charakter hydrofilowy. Duża powierzchnia właściwa i związana z tym wysoka wodożądność powodują redukcję ilości wolnej wody dostępnej do procesu hydratacji, a w konsekwencji prowadzą do ograniczonej urabialności kompozytów cementowych. W prezentowanych wynikach badań nanomagnetyt charakteryzujący się relatywnie niską powierzchnią właściwą i nieporowatą strukturą, dlatego jego wpływ na konsystencję badanych zapraw był znikomy.



Rys. 5. Konsystencja zapraw modyfikowanych nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 

### 3.3. Wytrzymałość na zginanie i ściskanie

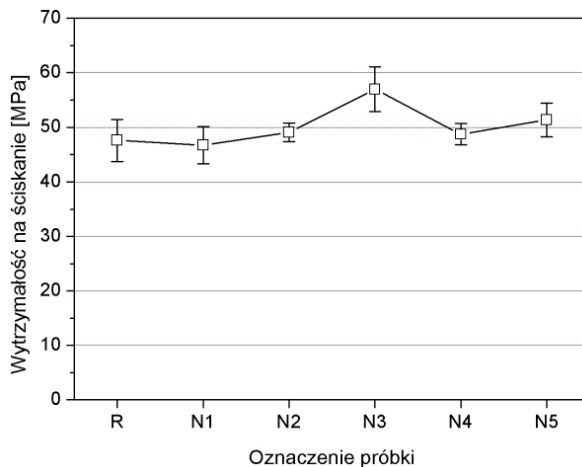
Wyniki badań wytrzymałości na zginanie i ściskanie zapraw cementowych po 28 dniach dojrzewania przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Widać, że wraz ze wzrostem zawartości nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  w zaprawach, występuje tendencja do zmniejszania się wytrzymałości na zginanie. Niemniej jednak efekt ten nie jest znaczący. Przyczyną spadku wytrzymałości na zginanie wraz ze wzrostem zawartości  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  w kompozycie może być nierównomiernie rozmieszczenie nanocząstek w zaczynie cementowym [14].



Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych po 28 dniach dojrzewania

Wpływ nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  jest bardziej widoczny w przypadku wytrzymałości na ściskanie, która jest głównym parametrem opisującym kompozyty cementowe. Wyniki badań

wytrzymałości na ściskanie zapraw przedstawione na rysunku 6 pokazują, że mała ilość  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nie wpływa istotnie na wytrzymałość na ściskanie zapraw. Niemniej jednak poprawę wytrzymałości zanotowano dla próbek zawierających 3% nanomagnetytu (próbki N3). Wzrost zawartości nanomagnetytu do 4 i 5% nie spowodował dalszej poprawy wytrzymałości.



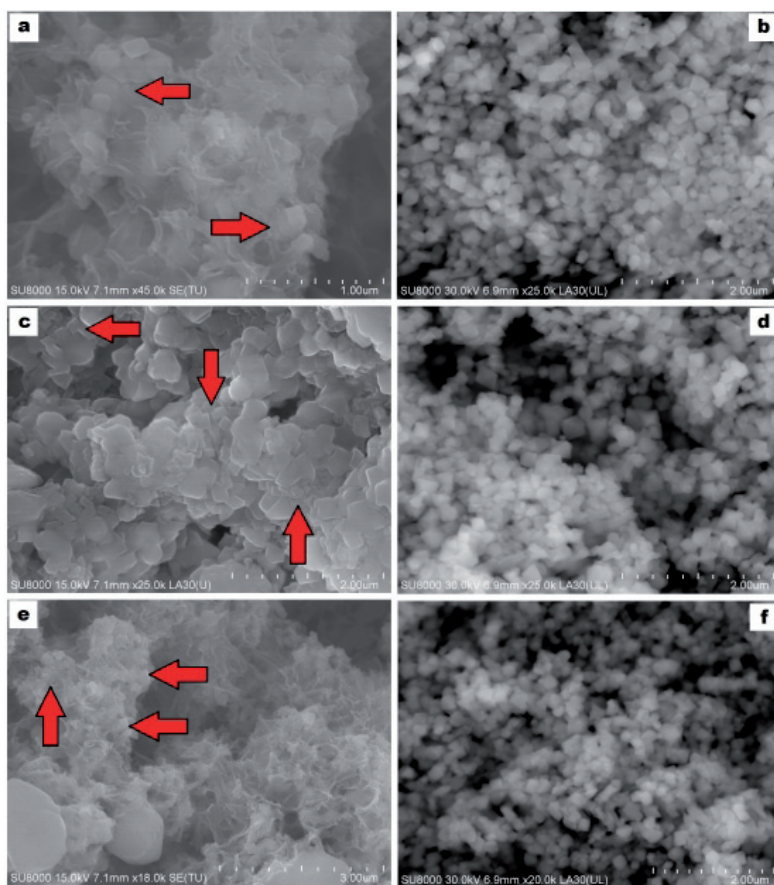
Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych po 28 dniach dojrzewania

Z prezentowanych na rysunku 6 wyników, domieszka 3% nanomagnetytu wydaje się być optymalną ilością. Uzyskane wyniki badań potwierdzają obserwacje poczynione w badaniach opisanych w pracach [2, 22], w których wykazano, że istnieje pewna optymalna ilość  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  lub  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , która może mieć pozytywny wpływ na wzrost wytrzymałości kompozytu, a przekroczenie tej wartości może prowadzić do spadku wytrzymałości. Według badań przeprowadzonych przez [12], dwa zjawiska mogą być odpowiedzialne za pozytywny wpływ nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  na wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych. Po pierwsze, mały rozmiar cząstek składników cementu może znacznie wpłynąć na kinetykę procesu hydratacji. Ze względu na ich mocną siłę przyciągania elektrostatycznego oraz o znacznie większą powierzchnię właściwą następuje szybsze wiązanie i twardnienie zmodyfikowanego zaczynu cementowego [1]. Cząstki nanomateriałów mogą przyspieszyć tempo hydratacji cementu ze względu na ich wysoką aktywność. Zjawisko to opisane zostało w pracy [2], gdzie zastosowano niewielką ilość nanometrycznych cząstek  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  wprowadzonych do zaczynu cementowego (do 0,3% masy cementu). W momencie rozpoczęcia procesu hydratacji, zachodzi dyfuzja produktów hydratacji, a nanometryczne cząstki zostają otoczone i stają się zarodnikami wokół których skupiają się hydraty. Jeżeli ilość nanocząstek będzie optymalna, proces krystalizacji będzie kontrolowany i wzrost kryształów  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zostanie zatrzymany przez nanocząstki, co w efekcie spowoduje poprawę mikrostruktury zaczynu cementowego. Natomiast, kiedy ilość nanocząstek jest zbyt duża, kryształy  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nie mogą urosnąć dostatecznie ze względu na ograniczone miejsce w matrycy. Prowadzi to do wzrostu skurczu i pęcznienia w matrycy cementowej, czego efektem jest zwiększona porowatość matrycy [10, 12]. Po drugie nanocząstki ze względu na ich nanometryczny rozmiar wypełniają pory i obserwujemy tzw. efekt „nano-

wypełnienia” (ang. nanofiller effect) prowadzący do dalszego zagęszczenia mikrostruktury [22]. Te dwa główne zjawiska prowadzą do poprawy mikrostruktury kompozytu poprzez zmniejszenie ilości porów, poprawiając wiązanie między kruszywem a zaczynem cementowym, a także zwiększając gęstość kompozytu cementowego [10].

### 3.4. Analiza mikroskopowa SEM

Do analizy nanocząstek w kompozycie wybrano próbki o optymalnej ilości nanomagnetytu (N3) i wykonano analizę mikroskopową. Szczegółowa analiza mikroskopowa SEM zaczynów cementowych zawierających nanomagnetyt potwierdza wkomponowanie się nanomagnetytu w matrycę cementową. Zdjęcia referencyjne nanocząstek przedstawione są na rysunku 8 b, d, f. W oparciu o analizę EDX rozmiar i kształt indywidualnych i zaglomerowanych nanocząstek został zidentyfikowany i zaznaczony czerwonymi strzałkami (rysunek 8 a, c, e).



Rys. 8. Nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  w kompozycie cementowym (a,c,e) oraz zdjęcia referencyjne samego nanomagnetytu (b, d, f)

Z poniższej analizy mikroskopowej można wywnioskować, że jest pewna stosowna ilość nanododatku, która może być pozytywnie wkomponowana w kompozyt cementowy aby poprawić jego ostateczne właściwości. W przypadku modyfikacji kompozytu nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , widoczny jest pozytywny wpływ nanodomieszki na mikrostrukturę kompozytu, jakkolwiek przekroczenie pewnej optymalnej ilości prowadzi do tworzenia się lokalnych aglomeracji nanomateriału, który może mieć negatywny wpływ na odpowiedź mechaniczną kompozytu.

## 4. Wnioski

Przeprowadzone badania były poświęcone charakterystyce wpływu nanomagnetytu na mikrostrukturę oraz wytrzymałość kompozytów cementowych. Na podstawie uzyskanych wyników wyciągnięto następujące wnioski:

- domieszka nanomagnetytu w ilości do 5% masy cementu nie miała istotnego wpływu na konsystencję badanych zapraw cementowych,
- nanocząstki  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  mogą zostać skutecznie wykorzystane jako nanowypełniacz do kompozytów cementowych, a ich obecność nie ma wpływu na główne produkty jak i przebieg procesu hydratacji,
- cząstki nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  mają tendencję do aglomeracji, zatem duża ilość domieszki nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  może prowadzić do tworzenia się aglomeratów i mikropęknięć, które mogą być przyczyną obniżenia parametrów wytrzymałościowych kompozytów cementowych,
- istnieje pewna optymalna ilość nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , która ma pozytywny wpływ na właściwości kompozytu cementowego, przekroczenie tej wartości może zneutralizować pozytywny wpływ obecności nanomagnetytu.

**Badania finansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego nr DEC- 2014/13/ B / ST8 / 03875 (OPUS 7)**

## Literatura

- [1] Amer AA, El-Sokkary TM, Abdullah NI.: Thermal durability of OPC pastes admixed with nano iron oxide. HBRC Journal, 2015; Vol.11(2), str. 299–305.
- [2] Amin MS, El-Gamal SMA, Hashem FS.: Effect of addition of nano-magnetite on the hydration characteristics of hardened Portland cement and high slag cement pastes. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013, Vol. 112(3), str. 1253–1259.
- [3] Badawy SM, El-Latif AAA. Synthesis and Characterizations of Magnetite Nanocomposite Films for Radiation Shielding. Polymer Composites, 2015; DOI: 10.1002/pc.23660.
- [4] Blaney L: Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ): Properties, Synthesis, And Applications, 2007, Vol. 15, Paper 5, <http://preserve.lehigh.edu/cas-lehighreview-vol-15/5/> (2007)
- [5] Bogdan J, Jackowska-Tracz A, Zarzyńska J, Plawinska-Czarnak J.: Chances and limitations of nanosized titanium dioxide practical application in view of its physicochemical properties. Nanoscale Research Letters, 2015; Vol.10, str. 1-10.
- [6] Brandt A.M., Józwiak-Niedźwiecka D.: The influence of ionizing radiation on microstructure and properties of concrete shields – a review, Cement, Wapno, Beton, 2013, Vol.18, No.4, str. 216–237.
- [7] Cao J, Chung DDL.: Use of fly ash as an admixture for electromagnetic interference shielding. Cement and Concrete Research, 2004, Vol. 34, str.1889–1892.
- [8] Demir F, Budak G, Sahin R, Karabulut A, Oltulu M, Un A.: Determination of radiation attenuation

- coefficients of heavyweight- and normal-weight concretes containing colemanite and barite for 0.663 MeV  $\gamma$ -rays. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, Vol. 38, str. 1274–8.
- [9] Hassan HE, Badran HM, Aydarous A, Sharshar T.: Studying the effect of nano lead compounds additives on the concrete shielding properties for  $\gamma$ -rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics. Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015, Vol. 360, str. 81–89.
- [10] Khoshakhlagh A, Nazari A, Khalaj G. Effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles on Water Permeability and Strength Assessments of High Strength Self-Compacting Concrete. *Journal of Materials Science & Technology*, 2012, Vol. 28(1), str. 73–82.
- [11] Nambiar S, Osei EK, Yeow JTW.: Polymer nanocomposite-based shielding against diagnostic X-rays. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, Vol. 127(6), str. 4939–4946.
- [12] Nazari A, Riahi S.: Computer-aided design of the effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on split tensile strength and water permeability of high strength concrete. *Materials and Design*, 2011, Vol. 32, str. 3966–3979.
- [13] Oltulu M, Sahin R.: Effect of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study. *Energy and Buildings*, 2013, Vol. 58, str. 292–301.
- [14] Oltulu M, Sahin R. Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume. *Materials Science and Engineering: A*. 2011, Vol. 528, str. 7012–7019.
- [15] Ouda AS, Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, Vol. 79, str. 48–55.
- [16] Rajavikraman RS.: Novel Method for Radiation Shielding Using Nano-Concrete Composite. *International Journal of Materials Science and Engineering*. 2013; Vol. 1(1), str. 20–23.
- [17] Rashad AM. A synopsis about the effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and nano-clay on some properties of cementitious materials – A short guide for Civil Engineer. *Materials and Design*. 2013, Vol. 52, str. 143–57.
- [18] Rezaei-Ochbelagh D, Azimkhani S.: Investigation of gamma-ray shielding properties of concrete containing different percentages of lead. *Applied Radiation and Isotopes*, 2012, Vol. 70, str. 2282–2286.
- [19] Rezaei-Ochbelagh D, Azimkhani S, Gasemzadeh Mosavinejad H. Shielding and strength tests of silica fume concrete. *Annals of Nuclear Energy*. 2012, Vol. 45, str.150–154.
- [20] Shekari AH, Razzaghi MS. Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete. *Procedia Engineering*. 2001, Vol. 14, str. 3036–3041.
- [21] Silvestre J, Silvestre N, de Brito J. Review on concrete nanotechnology. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, str. 1–31.
- [22] Yazdi NA, Arefi MR, Mollaahmadi E, Nejand BA. To study the effect of adding Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar. *Life Science Journal*, 2011, Vol. 8(4), str. 550–554.
- [23] Yilmaz E, Baltas H, Kiris E, Ustabas I, Cevik U, El-Khayatt AM. Gamma ray and neutron shielding properties of some concrete materials. *Annals of Nuclear Energy*. 2011, Vol. 38, str. 2204–2212.