

prof. dr hab. inż. Elżbieta Horszczaruk^{1)*}

ORCID: 0000-0003-0840-5048

dr inż. Piotr Brzozowski¹⁾

ORCID: 0000-0003-4146-9203

Mechanical and protective properties of cement mortar modified with nanomagnetite under high temperature conditions

Właściwości mechaniczne i osłonowe zaprawy cementowej, modyfikowanej nanomagnetytem, w wysokiej temperaturze

DOI: 10.15199/33.2026.04.01

Abstract. The aim of this study was to investigate the effect of nanomagnetite admixture on the mechanical and shielding properties of cement mortar under high temperature conditions. In the event of nuclear facility failures (e.g., related to cooling water leakage), temperatures above 300°C are observed. Because cement paste loses its properties at temperatures of 600-800°C, testing was conducted only up to 800°C. This paper presents the results of tests on cement mortars whose composition was modified with the addition of 5% (by weight of cement) of commercial magnetite nanostructures. Cubic concrete samples with sides of 50 mm were subjected to oven heating at temperature of 300°C, 450°C, 600°C and 800°C. The heating and cooling rate was 1°C/min, and the maximum heating temperature was maintained for 1 hour. After the cooling process was completed, the samples were irradiated with gamma rays emitted by a cesium isotope for 1 hour. The linear gamma radiation attenuation coefficient μ was determined. Comparative tests were also conducted for the reference mortar without the nanomodifier. Samples with nanomagnetite showed a slight improvement in the attenuation coefficient and a significant improvement in compressive strength over the tested temperature range.

Keywords: nanomagnetite; gamma radiation; high temperature; compressive strength of the cement mortar.

Streszczenie. Celem badań było sprawdzenie, jak wpływa domieszka nanomagnetytu na właściwości mechaniczne i osłonowe zaprawy cementowej w warunkach wysokiej temperatury. W przypadku awarii obiektów nuklearnych (np. związanych z wyciekami wody chłodzącej) występuje temperatura powyżej 300°C. W związku z tym, że zaczyn cementowy traci właściwości w temperaturze 600 – 800°C, badania prowadzono tylko do temperatury 800°C. W artykule przedstawiono wyniki badań zaprawy cementowej, której skład zmodyfikowano dodatkiem nanozwiązków Fe_3O_4 w ilości 5% w stosunku do masy cementu. Próbkę betonową w kształcie sześcianów o boku 50 mm poddawano wygrzewaniu w piecu w temperaturze: 300; 450; 600 i 800°C. Szybkość nagrzewu i studzenia próbek wynosiła 1°C/min, a temperatura maksymalna wygrzewania utrzymywana była przez godzinę. Po zakończeniu procesu studzenia próbki poddawano naświetlaniu promieniami gamma emitowanymi przez izotop cezu, przez godzinę. Wyznaczono liniowy współczynnik tłumienia promieniowania gamma μ . W celach porównawczych przeprowadzono również badanie zaprawy referencyjnej bez nanomodifikatora. W przypadku próbek z nanomagnetytem uzyskano nieznaczna poprawę współczynnika tłumienia oraz znaczną poprawę wytrzymałości na ściskanie w badanym zakresie temperatury.

Słowa kluczowe: nanomagnetyt; promieniowanie gamma; wysoka temperatura; wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej.

Together with the rapid development of nuclear power plants and medical radiation equipment, there is a growing need for construction materials that provide effective anti-radiation protection and high strength. The shielding concrete usually contains high-density aggregates, such as magnetite, limonite, or barite, to effectively absorb neutrons, X-rays, and gamma radiation [1 ÷ 4]. Exposure to high temperature is a key factor affecting the degradation of cement composites, as it generates significant thermal gradients and stresses. Ensuring stable mechanical and shielding performance is an important goal when designing cement composites that protect against

raz z szybkim rozwojem elektrowni jądrowych i urządzeń do promieniowania medycznego, zwiększa się zapotrzebowanie na materiały konstrukcyjne, które jednocześnie zapewniają skuteczną ochronę przed promieniowaniem oraz dużą wytrzymałość. Betony chroniące przed promieniowaniem zawierają zazwyczaj kruszywa o bardzo dużej gęstości, takie jak magnetyt, limonit czy baryt, aby skutecznie tłumić neutrony, promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie gamma [1 ÷ 4]. Ekspozycja na wysoką temperaturę jest kluczowym czynnikiem wpływającym na degradację kompozytów cementowych, ponieważ powoduje znaczne gradienty termiczne i naprężenia. Zapewnienie stabilnych właściwości mechanicznych i osłonowych jest ważnym elementem projektowania kompozytów cementowych chroniących przed promieniowaniem. W przypadku napromieniowania cezem (^{137}Cs o energii

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

^{*}) Correspondence address: elzbieta.horszczaruk@zut.edu.pl

radiation. In the case of irradiation by cesium (^{137}Cs with the energy 0.662 MeV), gamma rays absorption is dominated by Compton's dissipation [5] and the linear absorption coefficient, μ , is very sensitive to changes in the material's density and pore structure [6].

In the performed tests, the standard cement mortar has been modified with a commercial nanomagnetite admixture, produced by chemical synthesis, at 5% by cement mass. The effect of heating the modified mortar at temperature from $300 \div 800^\circ\text{C}$ was investigated with respect to apparent density, mass loss, microstructure (using an optical microscope), compressive strength, and gamma-ray shielding protection. The results are important for a new generation of multi-functional cement-based shields.

Materials and test samples preparation

Portland cement CEM I 42.5 R according to PN-EN 197-1 [7] was used for samples preparation together with natural sand (0 – 2 mm). The Fe_3O_4 nanoparticles were purchased from Merck (Sigma-Aldrich, 637106). The TEM image of magnetite (Figure 1a) shows the cubic shape of Fe_3O_4 particles measuring 50 – 100 nm. The magnetite phase presence was confirmed by XRD analysis (Figure 1b).

To better arrange Fe_3O_4 nanoparticles in the cement mortar, the nanopowder was dispersed in the mixing water using ultrasound before adding the mixing water to the mortar's dry components. The method for dispersing nanoaddmixtures was described in [10]. For all tested mortars, the mass ratio of cement to sand and to water was 1 : 3 : 0.5. The mortar specimens containing 5% of Fe_3O_4 nanoaddmixture (ZN) per cement mass and reference mortar

0,662 MeV), tłumienie promieniowania gamma jest zdominowane przez rozpraszanie Comptona [5], a współczynnik tłumienia promieniowania μ jest bardzo wrażliwy na zmiany gęstości materiału i struktury porów [6].

W przeprowadzonych badaniach normową zaprawę cementową zmodyfikowano domieszką komercyjnego nanomagnetytu uzyskanego na drodze syntezy chemicznej w ilości 5% masy cementu. Badany był wpływ wygrzewania modyfikowanej zaprawy w temperaturze $300 \div 800^\circ\text{C}$ na gęstość objętościową, utratę masy, mikrostrukturę (za pomocą mikroskopu optycznego), wytrzymałość na ściskanie i właściwości osłonowe przed promieniowaniem gamma. Wyniki te mają istotną wartość teoretyczną i praktyczną w przypadku osłon wielofunkcyjnych nowej generacji na bazie cementu.

Materiały i sposób przygotowania próbek do badań

Do wykonania próbek zastosowano cement portlandzki CEM I 42.5 R zgodny z wymaganiami PN-EN 197-1 [7], kruszywo naturalne w postaci piasku (0 – 2 mm) oraz nanocząstki Fe_3O_4 użyte jako nanodomieszka. Obraz magnetytu uzyskany metodą TEM (rysunek 1a) pokazuje, że nanocząstki Fe_3O_4 mają kształt sześcienny o boku 50 – 100 nm. Obecność fazy magnetytowej nanocząstek tlenku żelaza została potwierdzona za pomocą analizy XRD (rysunek 1b).

W celu lepszego rozmieszczenia nanocząstek Fe_3O_4 w zaprawie cementowej, nanoproszek został zdyspergowany za pomocą ultradźwięków w wodzie zarobowej przed jej dodaniem do suchych składników zaprawy. Metoda dyspersji nanodomieszki proszkowej została omówiona w [9]. W przypadku wszystkich badanych zapraw stosunek wagowy cementu

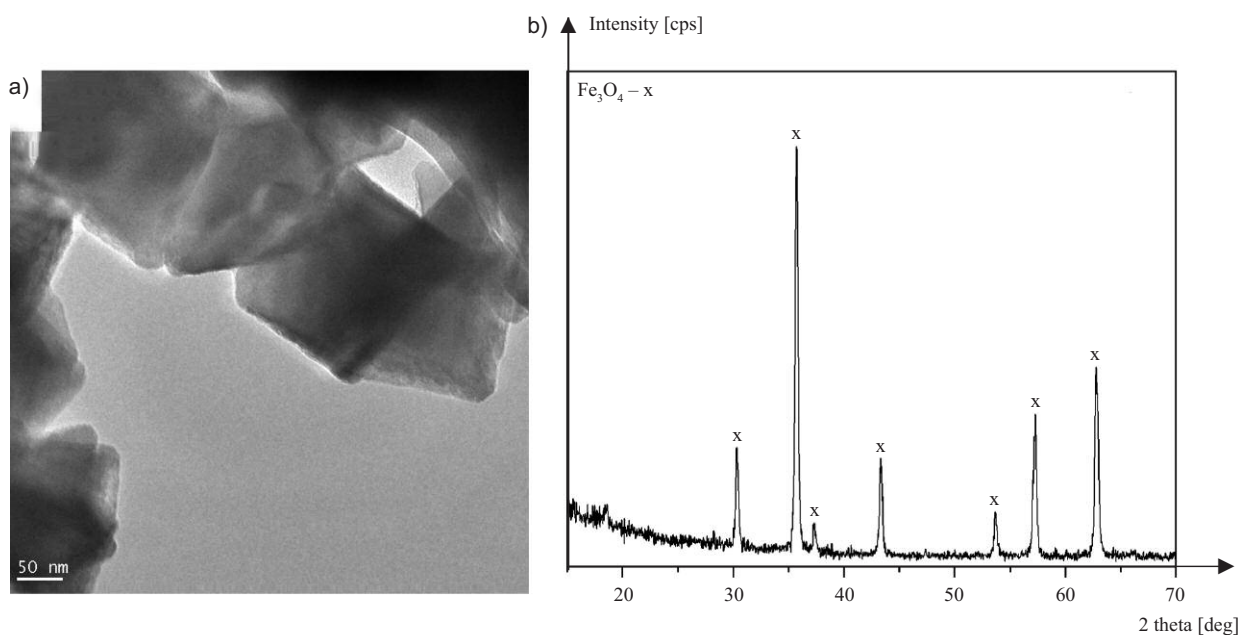


Fig. 1. TEM image (a) and X-Rays diffraction pattern (b) of Fe_3O_4 nanoparticles [9]

Rys. 1. Nanocząstki Fe_3O_4 ; a) mikrografia TEM; b) dyfraktogram rentgenowski [9]

(ZR) specimens were prepared in the steel moulds, in the form of cubes with a side of 50 mm. The specimens in the moulds were stored on the grate over the water and were demoulded after 24 hours. They were then stored in the special chamber at 95% relative humidity and $20 \pm 2^\circ\text{C}$; at 28 days of age, the specimens were removed from the chamber, weighed, and heated in the dryer at 105°C for 7 days. After drying, the specimens were weighed again and placed in the desiccator until the start of the oven heating process. Three specimens of every mortar have been prepared for testing at every specified temperature.

Specimens were heated to 300°C , 450°C , 600°C , and 800°C . At 28 days of age, the specimens were weighed and transferred from the climate chamber to the laboratory dryers for 7 days, then dried at 105°C to constant mass. After drying, the specimens were weighed to determine apparent density, then heated to the specified temperature. The heating process was conducted in a medium-temperature electric chamber oven equipped with temperature-control software. The specimens were placed in the oven so that they did not contact each other or the oven heating elements. In the first stage, the temperature rose at $1^\circ\text{C}/\text{min}$. The specified temperature was then maintained for 1 hour. The cooling was carried out at the rate of $1^\circ\text{C}/\text{min}$. example of a heating scheme for mortars specimens is presented in Figure 2.

Test methods

An investigation of the mortars' shielding performance was conducted on a specially designed test stand. The testing arrangement is shown in Figure 3, and the test stand image is shown in Photo 1. The specimens were irradiated with gamma rays from a ^{137}Cs source with an activity of 10 mSv and a photon energy of 0.662 MeV. Gamma radiation was detected using a scintillation detector coupled with a spectrometer. The experimental data were recorded on a PC using dedicated software. The distance

do piasku i do wody wynosił 1 : 3 : 0,5. Próbkę zaprawy z nanodomieszką Fe_3O_4 (ZN) w ilości 5% masy cementu oraz zaprawy referencyjnej (ZR) wykonano w formach stalowych w postaci sześciątów o boku 50 mm. Po zaformowaniu próbki przechowywano w formach nad rusztem z wodą, a po upływie 24 h rozformowano je. Przez kolejne dni lub do czasu badania, próbki przechowywano w specjalnej komorze, w której zapewniono wilgotność 95% oraz stałą temperaturę $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Wszystkie próbki zapraw poddano procesowi wygrzewania w temperaturze: 300°C ; 450°C ; 600°C ; i 800°C . Po 28 dniach zostały zważone i przeniesione z komory klimatycznej do suszarki laboratoryjnych na okres 7 dni, gdzie były suszone w temperaturze 105°C do stałej masy. Próbki po wyjęciu z suszarki ważono i mierzono w celu wyznaczenia gęstości objętościowej, a następnie poddano wygrzewaniu w oznaczonej temperaturze. Wygrzewanie prowadzono w średnio-temperaturowym elektrycznym piecu komorowym z oprogramowaniem do sterowania temperaturą podczas wygrzewania próbek. Próbki ustawiano w piecu w taki sposób, aby nie stykały się ze sobą oraz nie dotykały elementów grzewczych pieca. W pierwszym etapie przyrost temperatury następował z prędkością $1^\circ\text{C}/\text{min}$. Następnie przez 1 h utrzymywano maksymalną temperaturę zgodnie z programem badań. Studzenie próbek odbywało się z prędkością $1^\circ\text{C}/\text{min}$. Przykładowy schemat wygrzewania próbek zaprawy przedstawiono na rysunku 2.

Metody badań

Badanie właściwości osłonowych zapraw przeprowadzono na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rysunku 3, a widok stanowiska do badań odporności na promieniowanie gamma na fotografii 1. Próbkę napromieniowano źródłem promieniowania gamma ^{137}Cs o aktywności 10 mSv i energii fotonów 0,662 MeV. Do detekcji przechodzącego promieniowania gamma wykorzystano detektor scyntylacyjny sprzężony ze spektrometrem.

Dane eksperymentalne rejestrowano za pomocą oprogramowania laboratoryjnego na komputerze PC. Odległość między źródłem promieniowania gamma a detektorem ustawiono na 350 mm. Po schłodzeniu próbki zapraw umieszczono między źródłem promieniowania gamma a detektorem. Pomiar prowadzono przez 60 min.

Wiązka promieniowania gamma, przechodząc przez ośrodek, doznaje osłabienia na skutek oddziaływania z atomami ośrodka. Opisuje je znane prawo osłabienia promieniowania, które w przypadku monochromatycznej i wąskiej wiązki promieniowania ma postać zależności, zwanej prawem Lamberta-Beera:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

gdzie:

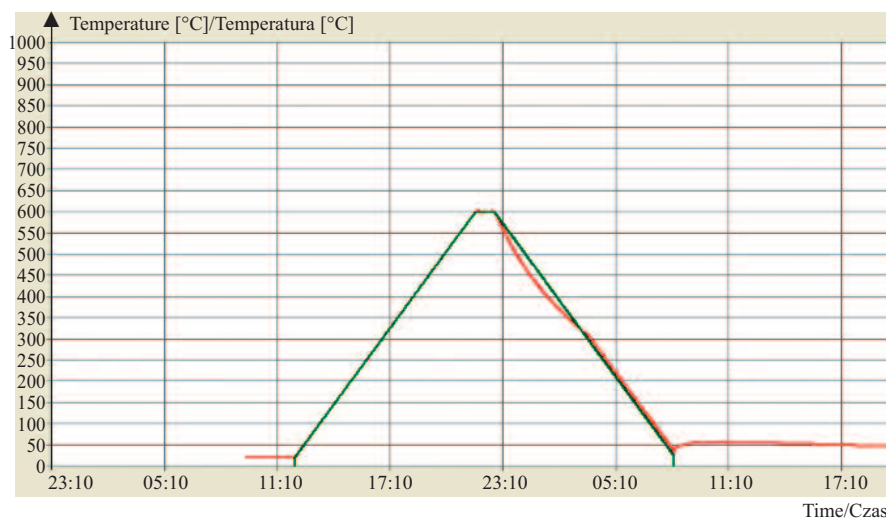


Fig. 2. Scheme of mortars specimens heating at the temperature of 600°C (green line – assumed heating scheme, red line – real temperature measurement)

Rys. 2. Schemat wygrzewania próbek zapraw w temperaturze 600°C (linia zielona – założony schemat wygrzewania, linia czerwona – rzeczywisty pomiar temperatury wygrzewania)

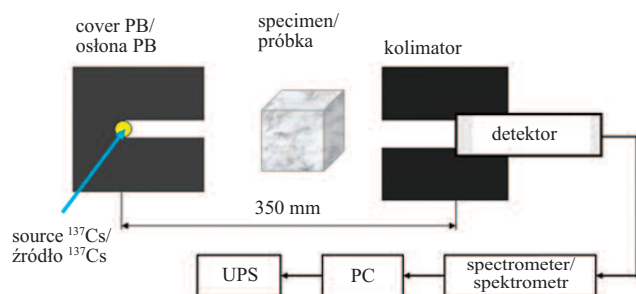


Fig. 3. Scheme of the stand for testing the shielding properties of concrete against the gamma radiation

Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego do określania właściwości ekranowania promieniowania gamma betonów

between the gamma ray source and the detector was set to 35 cm. After cooling, the mortar specimens were placed between the source and detector, and measurements were performed for 60 minutes.

A radiation beam passing through a medium is weakened due to interaction with the medium's atoms. This phenomenon is described by a radiation attenuation law, which for a monochromatic and narrow beam is given by Lambert-Beer's law:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

where:

x – absorbing layer thickness;

I_0 – number of the particles emitted by the radioactive source within the time unit (radiation intensity before the absorbent);

I – number of the particles detected after passing the layer of thickness x within the time unit (radiation intensity after passing the absorbent);

μ – linear attenuation coefficient.

The physical meaning of the linear coefficient of radiation attenuation results from the relationship:

$$\mu = \frac{-\Delta I}{I \Delta x} \quad (2)$$

Therefore, the linear radiation attenuation (weakening) coefficient, means the relative decrease of the intensity of the narrow monoenergetic radiation beam on the unit road. The unit of the coefficient is usually cm^{-1} .

Because of differences in the timing of the specimens' heating cycles, the strength testing was scheduled so that the specimens' ages were similar and did not affect the compressive strength determination results. **Immediately after completing the heating process, the specimens were cooled to $20 \pm 2^\circ\text{C}$, and their apparent density was determined.** The specimens were then irradiated with gamma rays. **After irradiation, the specimens were pressed using the strength machine in accordance with Standard PN-EN 12390-3 [11].** At the time of testing, the specimens were 38 to 40 days old. The specimens that were not heated (the reference samples) after demoulding were stored in the climate chamber at 95% relative humidity and a constant temperature of $20 \pm 2^\circ\text{C}$. **The reference samples' compressive strength** was determined after 38 days of curing in the climate chamber.

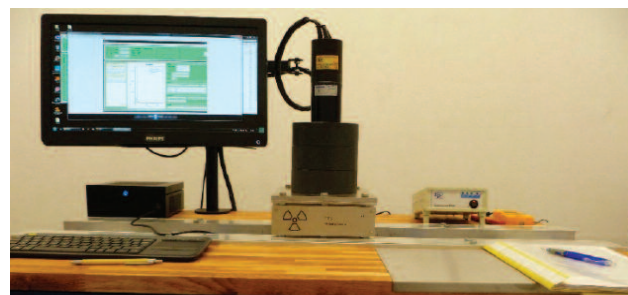


Photo 1. Stand for testing the building materials resistance to gamma radiation

Fot. 1. Stanowisko do badania odporności na promieniowanie gamma materiałów budowlanych

x – grubość warstwy pochłaniającej;

I_0 – liczba cząstek emitowanych w jednostce czasu przez źródło promieniotwórcze (natężenie promieniowania przed absorbentem);

I – liczba cząstek rejestrowanych w jednostce czasu po przejściu przez warstwę o grubości x (natężenie promieniowania po przejściu przez absorbent);

μ – liniowy współczynnik tłumienia wiązki promieniowania.

Sens fizyczny liniowego współczynnika osłabienia promieniowania wynika z zależności:

$$\mu = \frac{-\Delta I}{I \Delta x} \quad (2)$$

Liniowy współczynnik tłumienia (osłabienia) promieniowania oznacza więc względne zmniejszenie natężenia wąskiej wiązki promieniowania monoenergetycznego na jednostkowej drodze. Najczęściej jego wymiarem jest cm^{-1} .

Ze względu na różny czas trwania cykli wygrzewania próbek zaprawy, harmonogram badań wytrzymałościowych ustalono tak, aby wiek próbek po zakończeniu procesu wygrzewania był zbliżony i nie miał wpływu na oznaczenie wytrzymałości na ściskanie. **Bezpośrednio po zakończeniu procesu wygrzewania, próbki studzono do temperatury $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i oznaczano ich gęstość objętościową.** Następnie próbki poddawano naświetlaniom promieniami gamma. **Po zakończeniu procesu naświetlania próbki były ścisane w maszynie wytrzymałościowej zgodnie z PN-EN 12390-3 [10].** W chwili wykonywania badania wiek próbek wynosił 38 – 40 dni. Próbki niepoddane procesowi wypalania (tzw. próbki referencyjne) były po rozformowaniu przechowywane w komorze klimatycznej, w której zapewniono wilgotność 95% oraz stałą temperaturę $20 \pm 2^\circ\text{C}$. **Wytrzymałość na ściskanie próbek referencyjnych** oznaczono po 38 dniach dojrzewania w komorze klimatycznej.

Wyniki badań

Na rysunku 4 zestawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie badanych zapraw w funkcji temperatury wygrzewania. Niezależnie od temperatury średnia wytrzymałość na ściskanie próbek zapraw ZM była większa niż próbek zaprawy referencyjnej ZR. W przypadku próbek ZM wygrzewanych w temperaturze: 200, 300 i 450°C wytrzymałość na ściskanie była większa średnio o 12,5 do 13% w porównaniu z próbkami ZR. W temperaturze 600 i 800°C różnica wynosiła odpowiednio 13,2 i 12,4% na korzyść zapraw ZM. Zwiększenie wytrzymałości

Test results

Figure 4 presents compressive strength test results as a function of heating temperature. The average compressive strength of the tested mortars ZN specimens was higher than that of the reference mortar ZR specimens, regardless of the heating temperature. For the ZN mortar specimens heated at 200°C, 300°C, and 450°C, the compressive strength was 12.5% to 13% higher than that of the reference mortar specimens. For temperature 600°C and 800°C, the differences were 13.2% and 12.4%, respectively. The higher compressive strength of ZN mortars across the entire range of heating temperature can be explained by the compaction of the cement matrix by Fe_3O_4 nanoparticles. At 600°C and 800°C, the mechanical properties of both mortars were similar; they retained 30% and 20% of their initial strength, respectively.

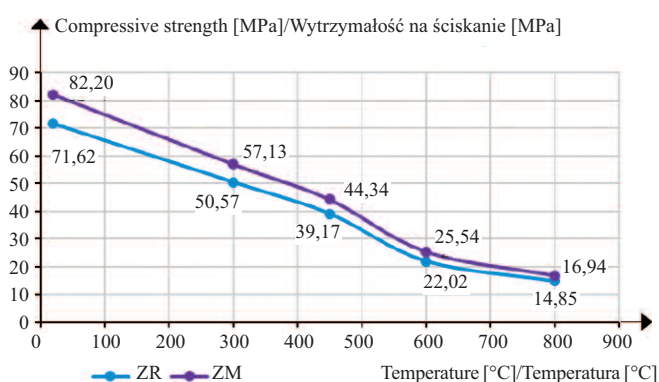


Fig. 4. Compressive strength of tested mortars as a function of heating temperature

Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie badanych zapraw w funkcji temperatury wygrzewania

The visual and microscopic observations show that the surfaces of the nanomodified mortars were much less cracked after heating at 300°C and 450°C than those of the reference mortar (Photo 2). After heating at the temperature of 600°C and 800°C the surfaces of all mortars are strongly cracked. The cracking is caused by the progressive decomposition of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and the dehydration of the C-S-H phase at temperature above 500°C [12]. The ring-shaped cracks around the aggregate grains are gradually widened as the temperature rises [13].

Figure 5 shows the results of the change in the apparent density of the tested mortar samples as a function of the annealing temperature. The increase in the density of the ZM mortars compared to the reference ZR mortar was very slight, because a very small amount of nanoadmixture was used.

The results of testing cement mortars' shielding performance against gamma radiation were analysed based on changes in the linear radiation attenuation coefficient, μ , under high-temperature conditions. The changes of μ are presented in Figure 6. The analysis shows that adding magnetite nanoparticles resulted in a slight increase in the linear attenuation coefficient across the entire temperature range. **Linear attenuation (weakening) coefficient depends**

na ściskanie zapraw ZM w całym zakresie temperatury można tłumaczyć zjawiskiem zagęszczenia matrycy cementowej przez nanocząstki Fe_3O_4 . W temperaturze 600 i 800°C właściwości mechaniczne obu zapraw były podobne. Zachowały one odpowiednio 30 i 20% swojej wytrzymałości początkowej.

Z obserwacji wizualnych i mikroskopowych wynika, że powierzchnia zaprawy ZM modyfikowanej nanocząstkami była o wiele mniej zarysowana po wygrzewaniu w temperaturze 300 i 450°C niż próbek zaprawy referencyjnej ZR (fotografia 2). W temperaturze 600 i 800°C powierzchnia próbek zapraw ZM i ZR jest silnie zarysowana. W wyniku postępującego rozkładu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i odwodnienia fazy C-S-H w temperaturze powyżej 500°C [11], pęknięcia pierścieniowe wokół ziaren piasku stopniowo się rozszerzają wraz ze wzrostem temperatury [12].

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki zmiany gęstości objętościowej badanych próbek zapraw w funkcji temperatury wygrzewania. Zwiększenie gęstości zaprawy ZM w porównaniu z zaprawą referencyjną ZR było nieznaczne, gdyż zastosowano bardzo niewielką ilość nanodomieszki.

Wyniki badań właściwości osłonowych zapraw cementowych przed promieniowaniem gamma analizowano na podstawie zmiany wartości liniowego współczynnika tłumienia promieniowania μ pod wpływem oddziaływania temperatury (rysunek 6). Z analizy uzyskanych wartości współczynnika μ wynika, że dodatek nanocząstek magnetytowych spowodował nieznaczne zwiększenie liniowego współczynnika tłumienia μ zaprawy ZN modyfikowanej nanocząstkami, w całym badanym zakresie temperatury. **Współczynnik ten zależy przede wszystkim od gęstości i porowatości**

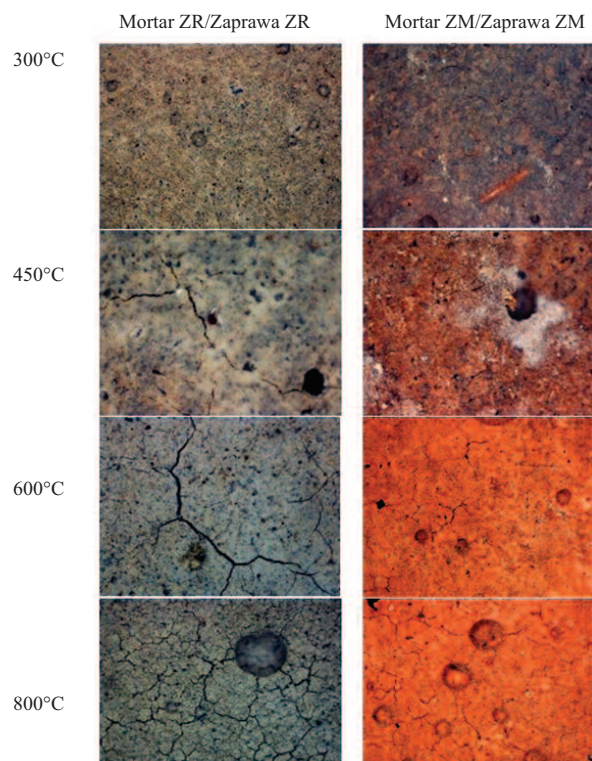


Photo 2. The surface of the tested mortars after heating at specified temperature

Fot. 2. Powierzchnia badanych zapraw po wygrzewaniu do określonej temperatury

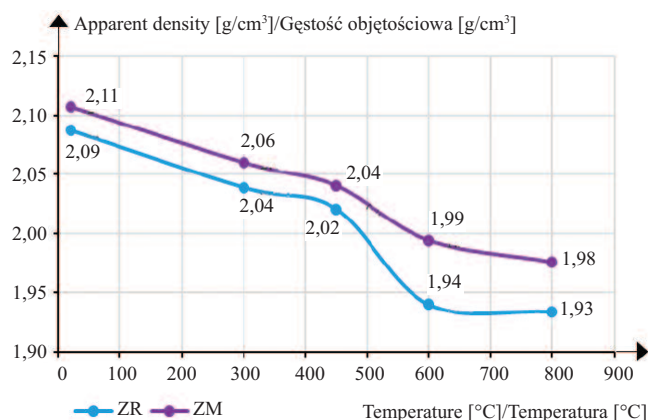


Fig. 5. Apparent density of the tested cement mortars as a function of heating temperature

Rys. 5. Gęstość objętościowa badanych zapraw cementowych w funkcji temperatury wygrzewania

mostly on the material's density and porosity. An effect of nanoadmixture on the linear attenuation coefficient μ is proportional to the density of the mortars.

Summary

The results of testing cement mortars modified with magnetite nanoparticles show that even a small content of nano- Fe_3O_4 increases the linear gamma radiation attenuation coefficient. The addition of nanoadmixture increases the compressive strength of cement mortars in the entire tested temperature range. It also limits the number and width of cracks in the cement matrix in the tested temperature range. The uniform dispersion of the nanoadmixture in the cement matrix is still a problem to resolve, since homogeneous dispersion prevents the composite's porosity from increasing. Research has shown that ultrasonic mixing of the mixing water and nanoadmixture solution has proven to be an effective method for dispersing the nanoadmixture in powder form within the mortar.

Received: 30.12.2025

Revised: 02.02.2026

Published: 22.04.2026

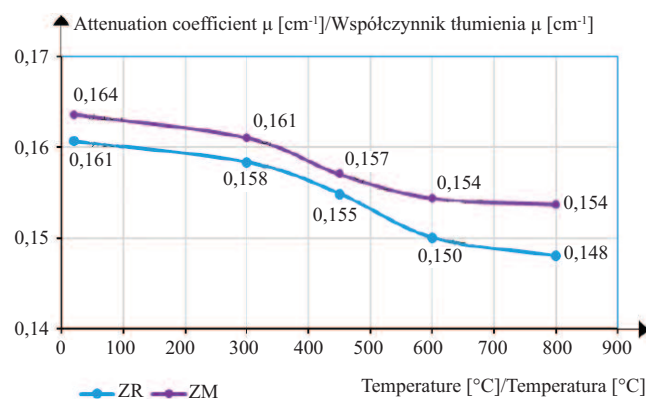


Fig. 6. Linear radiation attenuation coefficient μ of the tested mortars as a function of heating temperature

Rys. 6. Liniowy współczynnik tłumienia promieniowania μ w funkcji temperatury wygrzewania badanych zapraw

materialu. Widoczny jest wpływ nanodomieszki na zwiększenie wartości liniowego współczynnika tłumienia μ proporcjonalny do gęstości objętościowej badanych zapraw.

Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników badań zaprawy cementowej modyfikowanej nanocząstkami magnetytowymi stwierdzono, że już niewielka ilość nano- Fe_3O_4 zwiększa liniowy współczynnik tłumienia promieniowania gamma. Dodatek nanodomieszki powoduje też zwiększenie wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej w całym badanym zakresie temperatury i ogranicza liczbę oraz szerokość rys powstających w matrycy cementowej w czasie procesu wygrzewania. Problemem do rozwiązania pozostaje równomierna dyspersja nanodomieszki w matrycy cementowej, co zapobiega zwiększeniu porowatości kompozytu. Jak pokazały badania, skuteczną metodą dyspersji nanodomieszki w postaci proszku w zaprawie okazała się metoda mieszania roztworu wody zarobowej i nanodomieszki za pomocą ultradźwięków.

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.12.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 02.02.2026 r.

Opublikowano: 22.04.2026 r.

Literature

- [1] Oto B, Gür A, Kavaz E, Çakır T, Yaltay N. Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes. *Progress in Nuclear Energy*. 2016; t. 92, s. 71 – 80.
- [2] Zalegowski K, Piotrowski T, Garbacz A, Adamczewski G. Relation between microstructure, technical properties and neutron radiation shielding efficiency of concrete. *Construction and Building Materials*. 2020; t. 235, s. 117389.
- [3] Oto B, Yıldız N, Korkut T, Kavaz E. Neutron shielding qualities and gamma ray buildup factors of concretes containing limonite ore. *Nuclear Engineering and Design*. 2015; t. 293, s. 166 – 175.
- [4] Almeida Junior TA, Nogueirab MS, Vivoloc V, Potiensc MPA, Camposc LL. Mass attenuation coefficients of X-rays in different barite concrete used in radiation protection as shielding against ionizing radiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 2017; t. 140, s. 349 – 354.
- [5] El-Khayatt A. Calculation of photon shielding properties for some neutron shielding materials. *Nuclear Science and Techniques*. 2017; t. 28, s. 28 – 69.
- [6] Khalaf MA, Ban CC, Ramli M, Ahmed NM, Sern LJ, Khaleel HA. Physicomechanical and gamma-ray shielding properties of high-strength heavyweight concrete containing steel furnace slag aggregate. *Journal of Building Engineering*. 2020; t.30, s. 101306.

- [7] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.

- [8] Horszczaruk E, Brzozowski P, Sikora P, Cendrowski K, Mijowska E. The Effect of Nanomagnetite on the Shielding Properties of Cementitious Composites. *Advances in Construction Materials and System*. Vol. 2: proceedings of International Conference, Chennai, Sep 3 – 8, 2017.

- [9] Horszczaruk E, Łukowski P, Seul C. Influence of Dispersing Method on the Quality of Nano-Admixtures Homogenization in Cement Matrix. *Materials*. 2020; t. 13, s. 1 – 14.

- [10] PN-EN 12390-3:2019. Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

- [11] Ma Q, Guo R, Zhao Z, Lin Z, He K. Mechanical properties of concrete at high temperature. A review. *Construction and Building Materials*. 2015; t. 93, s. 371 – 383.

- [12] Horszczaruk E, Sikora P, Cendrowski K, Mijowska E. The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates. *Construction and Building Materials*. 2017; t. 137, s. 420 – 431.