

prof. dr hab. inż. Zdzisław Owsiak¹⁾

ORCID: 0000-0002-9278-912X

dr inż. Wioletta Grzmil^{1)*)}

ORCID: 0000-0001-9362-8224

mgr inż. Magdalena Tutaj-Dudała¹⁾

ORCID: 0009-0006-9871-4870

Influence of metahalloysite and CSA cement on the self-healing of cracks in cementitious composites cured in water

Wpływ metahaloizytu i cementu CSA na samozarastanie rys w kompozytach cementowych dojrzewających w wodzie

DOI: 10.15199/33.2025.08.05

Abstract. Partial or complete crack self-healing in cement composites can be achieved by using a cementitious binder containing additives. The purpose of this study was to evaluate the effect of metahalloysite and calcium sulfoaluminate cement additives on cracks self-healing in cement composites curing in water. The results of the study showed that the use of metahalloysite and CSA cement as cement additives influences the self-healing of cracks in cement composites matured in water.

Keywords: self-healing; cement composites; metahalloysite; calcium sulfoaluminate cement CSA.

Self-healing concrete is a building material in which cracks heal themselves, extending their durability [1 ÷ 7], and the introduction of mineral additives [8, 9] into cement and calcium sulfoaluminate binders promotes this process [10, 11] by forming hydrated silicates, aluminates, and calcium aluminate sulphates that fill cracks [12 ÷ 14].

In scratched elements, we define self-healing as the complete or partial restoration of material properties, divided into autogenic and autonomous processes. Autogenic processes are the natural ability of the composite to self-heal using materials traditionally used in concrete. Autogenous processes, on the other hand, involve the use of new substances such as bacteria or epoxy-filled capsules [1, 2].

The purpose of this study was to evaluate the effect of a cementitious binder composition containing the addition of metahalloysite and calcium sulfoaluminate cement on the self-growth of cement cracks in cement composites that cure in water. Steel fibres were also added to ensure the integration of the samples after crack.

Materials and research methods

A nine-point experimental design was used to determine the composition of the binder. The binder contained 30, 40, 50% CSA cement, 10, 15, 20% metahalloysite and Portland cement,

Streszczenie. Częściowe lub całkowite samozarastanie rys w kompozytach cementowych można uzyskać przez zastosowanie spoiwa cementowego zawierającego dodatki. Celem badań była ocena wpływu dodatku metahaloizytu i cementu wapniowo siarczanoglinianowego do cementu na samozarastanie rys w kompozytach cementowych dojrzewających w wodzie. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że zastosowanie metahaloizytu oraz cementu CSA jako dodatków do cementu ma wpływ na samozarastanie rys.

Słowa kluczowe: samozarastanie; kompozyty cementowe; metahaloizyt; cement wapniowo siarczanoglinianowy CSA.

Beton samonaprawiający się jest materiałem budowlanym, w którym zachodzi samozarastanie rys, przedłużając jego trwałość [1 ÷ 7], a wprowadzenie dodatków mineralnych [8, 9] do cementu oraz spoiwa wapniowo siarczanoglinianowego sprzyja temu procesowi [10, 11], przez tworzenie uwodnionych krzemianów, glinianów i glinosiarczanów wapnia wypełniających rysy [12 ÷ 14].

W elementach zarysowanych samoleczenie definiujemy jako całkowite lub częściowe przywrócenie właściwości materiału, z podziałem na procesy autogeniczne oraz autonomiczne. Procesy autogeniczne to naturalna zdolność kompozytu do samonaprawy przy użyciu materiałów tradycyjnie stosowanych w betonie. Natomiast procesy autonomiczne polegają na wykorzystaniu nowych substancji, takich jak bakterie czy kapsułki wypełnione żywicami epoksydowymi [1, 2].

Celem badań była ocena wpływ składu spoiwa cementowego zawierającego dodatek metahaloizytu i cementu wapniowo siarczanoglinianowego na samozarastanie rys w kompozytach cementowych, dojrzewających w wodzie. Dodawano także włókna stalowe zapewniające integrację próbek po wykonaniu rysy.

Materiały i metody badań

Do ustalenia składu spoiwa zastosowano dziewięciopunktowy plan eksperymentu. Spoiwo zawierało 30, 40, 50% cementu CSA, 10, 15, 20% metahaloizytu oraz cement portlandzki, który stanowił dopełnienie do 100%. Jako kruszywo

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury

^{*)} Correspondence address: wgrzmil@tu.kielce.pl

which made up the rest to 100%. Standard sand was used as aggregate. Metahalloysite was obtained by roasting natural halloysite for 2 hours at 750° C. To maintain the integrity of the samples after scratching, steel fibres (12.5 mm long and 0.20 mm in diameter) were added to the mortar at a volume of 1%. The water-binder ratio for all mortars was 0.45. Their composition is presented in table 1.

The samples were made according to EN 196-1:2016-07 [15] and stored in laboratory conditions with a relative humidity > 95% and in water for 6 days after demoulding. After this time, a crack was formed by a bending process, loading the mortar beam with a concentrated force in the centre of the span until the crack appeared. The stresses causing crack formation, in relation to the stresses after exceeding the limit state, ranged from 34.40% to 44.26%. The samples continued to cure in water after cracking.

In order to determine the parameters of the resulting cracks, the samples were scanned in a computer tomograph, and changes in the ultrasonic wave transit time were determined according to PN-EN 12504-4:2005 [16] using a concretoscope. The mortar beams were then cure in water and the samples in the CT scanner were performed after 210 days. Measurements of changes in ultrasonic wave speed were taken from the time of scratching after 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180 and 210 days. The same samples were analysed on the CT scanner. The tests were carried out on 3 specimens from each series.

The phase composition of the binder after 90 days of hydration under curing conditions was examined as in the case of mortars using X-ray diffraction (XRD). A diffractometer with a Cu anode was used. The test was carried out in the angular range of 2θ from 5 to 70°, at a step of 3.3°/min⁻¹. The phase composition of the binders was analysed using the ICDD PDF-2 database.

Test results and discussion

Figure 1 shows the variation of the ultrasonic wave velocity in scratched samples and figure 2 shows the variation of the ultrasonic wave velocity in uncracked samples (reference) as a function of the curing time. With cured time, the speed of transmission of ultrasonic waves increases in both witness and scratch specimens, possibly due to hydration of the binder and sealing of its microstructure. The speed of ultrasonic wave propagation through scratched samples is lower than that through control samples, but this difference decreases with curing time, which may indicate that the scratches are filled with the hydration products of the binder. Figure 3

Table 1. Composition of tested mortars [% by weight]

Tabela 1. Skład badanych zapraw [% wag.]

Mortar designation/Oznaczenie zapraw	CEM I 42,5R	CSA i. tech ALI CEM	Metahalloysite/ Metahaloizyt	Water/ Woda	Sand/ Piasek	Steel fibres/ Włókna stalowe
Z1	23,7	11,8	3,9	17,8	39,4	3,3
Z2	19,7	15,8	3,9	17,8	39,4	3,3
Z3	15,8	19,7	3,9	17,8	39,4	3,3
Z4	13,8	19,7	5,9	17,8	39,4	3,3
Z5	11,8	19,7	7,9	17,8	39,4	3,3
Z6	15,8	15,8	7,9	17,8	39,4	3,3
Z7	19,7	11,8	7,9	17,8	39,4	3,3
Z8	21,7	11,8	5,9	17,8	39,4	3,3
Z9	17,8	15,8	5,9	17,8	39,4	3,3

zastosowano piasek normowy. Metahaloizyt uzyskano w wyniku prażenia naturalnego haloizytu przez 2 h w temperaturze 750°C. W celu zachowania integralności próbek, po wykonaniu rysy dodano do zaprawy włókna stalowe (długości 12,5 mm i średnicy 0,20 mm) w ilości 1% objętościowo. Stosunek wodno-spoiwowy we wszystkich zaprawach wynosił 0,45. Ich skład przedstawiono w tabeli 1.

Próbki wykonano zgodnie z normą PN-EN 196-1:2016-07 [15] i przechowywano w warunkach laboratoryjnych w wilgotności względnej > 95%, a po rozformowaniu przez 6 dni w wodzie. Po tym czasie wykonano rysę w procesie zginania, obciążając beleczkę zaprawy siłą skupioną w środku rozpiętości, aż do momentu pojawienia się zarysowania. Naprężenia wywołujące powstawanie rys, w stosunku do naprężeń po przekroczeniu stanu granicznego, wynosiły od 34,40 do 44,26%. Po wykonaniu rys próbki nadal dojrzewały w wodzie.

W celu określenia parametrów powstałych rys wykonano skanowanie próbek w tomografii komputerowej oraz określono zmiany czasu przejścia fali ultradźwiękowej, zgodnie z normą PN-EN 12504-4:2005 [16], stosując betonoskop. Następnie beleczki zapraw dojrzewały w wodzie, a ponowne skanowanie próbek w tomografii komputerowej wykonano po 210 dniach. Pomiaru zmiany prędkości przechodzenia fali ultradźwiękowej wykonywano od czasu zarysowania po 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180 i 210 dniach. Analizie poddano te same próbki, które były badane w tomografii. Badania przeprowadzono na trzech próbkach z każdej serii.

Skład fazowy spoiwa, po 90 dniach hydratacji w warunkach dojrzewania zbadano jak w przypadku zapraw przy użyciu dyfrakcji rentgenowskiej XRD. Zastosowano dyfraktometr z anodą Cu. Badanie wykonano w zakresie kątowym 2θ od 5 do 70°, przy kroku 3,3°/min⁻¹. Analizę składu fazowego spoiwa wykonano z zastosowaniem bazy danych ICDD PDF-2.

Wyniki badań i ich omówienie

Na rysunku 1 zamieszczono przebieg zmiany prędkości przechodzenia fali ultradźwiękowej w zarysowanych próbkach, a na rysunku 2 w próbkach niezarysowanych (świadkach) w zależności od czasu dojrzewania. Z rysunków wynika, że z czasem dojrzewania zwiększa się prędkość przechodzenia fali ultradźwiękowej zarówno w próbkach świadkach, jak i próbkach z wytworzoną rysą. Może to być spowodowane hydratacją spoiwa i uszczelnieniem ich mikrostruktury. Prędkość przechodzenia fali ultradźwiękowej przez próbki zarysowane jest mniejsza niż przez próbki świadki, ale z czasem dojrzewania ta różnica się zmniejsza, co może świadczyć o wypełnieniu rys przez produkty uwodnienia spoiwa. Na rysunku 3

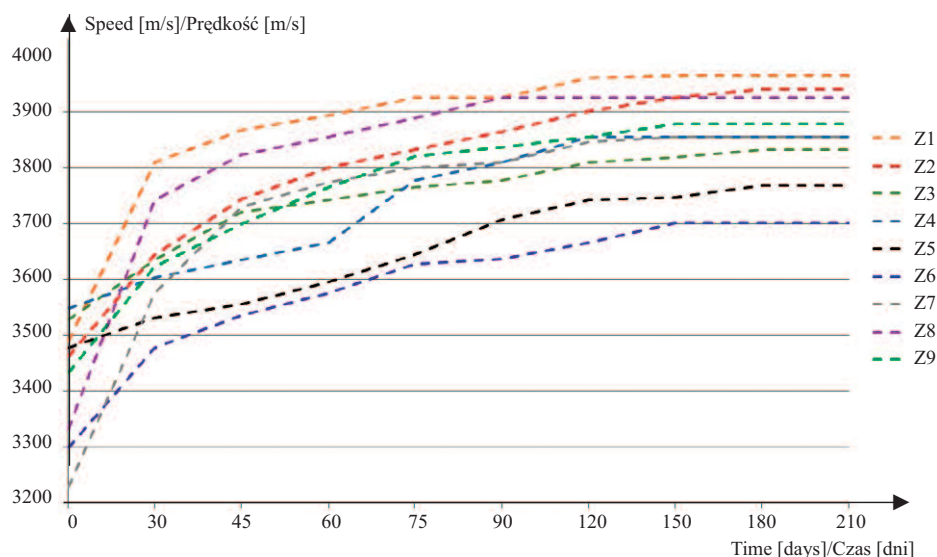


Fig. 1. Change in ultrasonic wave velocity for mortar samples with cracks as a function of time

Rys. 1. Zmiana prędkości przechodzenia fali ultradźwiękowej w przypadku próbek zapraw z rysami w zależności od czasu

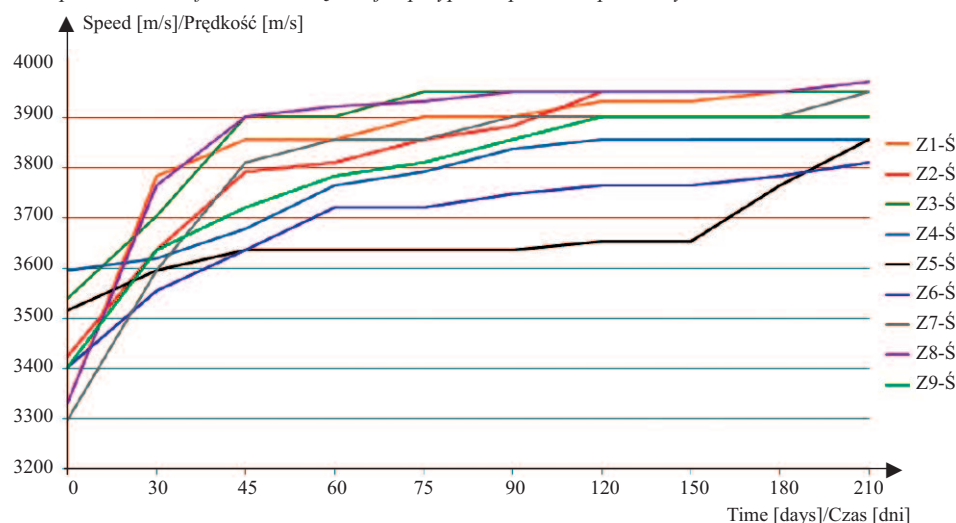


Fig. 2. Change in the speed of passage of the wave for noncracked mortar samples (references) as a function of time

Rys. 2. Zmiana prędkości przechodzenia fali w przypadku próbek zapraw niezarysowanych (świadków) w zależności od czasu

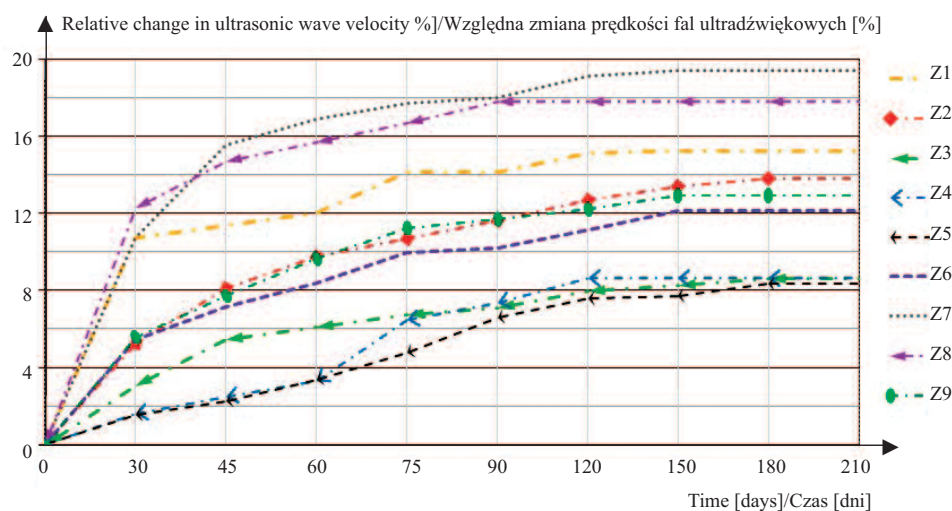


Fig. 3. Relative change in the velocity of the ultrasonic waves during curing in water

Rys. 3. Względna zmiana prędkości fal ultradźwiękowych w czasie dojrzewania w wodzie

shows the relative change in the velocity of the ultrasonic wave in the composite after different curing times in water, relative to the velocity immediately after the scratches were made.

The results of ultrasonic wave velocity tests indicate that the use of different amounts of metahalosite and calcium sulfoaluminate cement additives in cement affects the degree of crack filling with hydration products. In the first thirty days, an increase in the relative ultrasonic wave velocity of several percent is observed, and after approximately sixty days of curing in water, the rate of increase stabilises. Mortars Z8 and Z7 with 15% and 20% metahalosite and 30% calcium sulphate clay cement added were characterised by high wave velocity. Over a period of 210 days, the wave velocity for the mortar Z7 increased by 19.4% and for the mortar Z8 by 17.8% compared to the samples immediately after scratching. The smallest change in wave velocity was observed in mortars Z3, Z4, and Z5 with a binder containing 50% CSA and the addition of 10, 20 and 30% metahalosite, respectively. This change was 8.5% compared to the velocity after cracking.

Table 2 presents the results of computer tomography tests on cracked mortar samples, including the calculated crack volume, its change after 210 days of curing, and the calculated air void content in the sample relative to the total sample volume. The size of the tested sample with a crack in the centre was 40×40×40 mm.

Table 2. Volume of cracks and voids in mortar samples determined by CT after cracking and after 210 days of hydration

Tabela 2. Objętość rys i pustek w próbkach zapraw określona w tomografii komputerowej po wykonaniu rysy i po 210 dniach hydratacji

Tested parameters/Badane parametry	Designation of mortars/Oznaczenie zapraw								
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
Volume of crack after cracking [mm ³]/Objętość szczeliny po wykonaniu rysy [mm ³]	182	219	206	381	574	458	337	426	551
Fissure volume after 210 days [mm ³]/Objętość szczeliny po 210 dniach [mm ³]	165	128	161	373	528	391	308	310	431
Reduction in crack volume after 210 days [%]/Zmniejszenie objętości rysy po 210 dniach [%]	10	38	28	2	9	17	35	37	28
Air void content after cracking [%]/Zawartość pustek powietrznych po wykonaniu rysy [%]	1,74	2,34	1,97	2,58	2,77	3,37	2,35	2,91	1,91
Air void content after 210 days [%]/Zawartość pustek powietrznych po 210 dniach [%]	1,57	1,86	1,55	2,52	2,61	2,98	1,22	1,75	1,49
Change in the content of air void content over time [%]/Zmiana zawartości pustek powietrznych w czasie [%]	0,17	0,48	0,42	0,06	0,16	0,39	1,13	1,16	0,42

In the case of mortars with each of the binder compositions tested, a reduction in crack volume is observed at 210 days. Mortars Z2, Z7, and Z8 achieve crack volume reductions of more than 30%, while Z4 achieves approx. 2%. Furthermore, the Z7 and Z8 mortars showed a 1% reduction in the air void content, which may indicate better crack closure and lower porosity depending on the CSA and metahalosite content (15% and 20%). The test results showed that the samples with the greatest reduction in crack volume (by about 30%) had the greatest relative increase in ultrasonic wave velocity. Figure 4 shows the CT image of the sample after crack (figure 4a) and after 210 days of curing in water (figure 4b). The CT image of the crack allows the degree of crack filling to be determined. The colour scale, located next to the image of the sample, allows an approximate determination of the volume of the crack, which was approximately 600 mm³ after execution and approximately 400 mm³ after 210 days of sample maturation.

przedstawiono względną zmianę prędkości fal ultradźwiękowych w kompozycie po różnym czasie dojrzewania w wodzie, odniesioną do prędkości bezpośrednio po wykonaniu rys.

Wyniki badań prędkości fal ultradźwiękowych wskazują, że zastosowanie do cementu różnych ilości dodatku metahaloizytu i cementu wapniowo siarczanoglinianowego ma wpływ na stopień wypełnienia rys produktami hydratacji. W pierwszych trzydziestu dniach obserwuje się zwiększenie względnej prędkości fali ultradźwiękowej o kilka procent, a po ok. sześćdziesięciu dniach dojrzewania w wodzie następuje stabilizacja tempa jej wzrostu. Zaprawy Z8 i Z7 z dodatkiem 15 i 20% metahaloizytu i 30% cementu wapniowo siarczanoglinianowego cechowały się dużą prędkością fal. W ciągu 210 dni prędkość fal w przypadku zaprawy Z7 zwiększyła się o 19,4%, a zaprawy Z8 o 17,8% w porównaniu z próbkami bezpośrednio po zarysowaniu. Najmniejszą zmianę prędkości fal zaobserwowano w przypadku zapraw Z3, Z4 i Z5 ze spoiwem zawierającym 50% CSA oraz dodatkiem metahaloizytu odpowiednio 10, 20 i 30%. Zmiana ta wynosiła ok. 8,5% w porównaniu z prędkości po powstaniu rys.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań zarysowanych próbek zapraw metodą tomografii komputerowej, obejmujące wyliczoną objętość rysy, jej zmianę po 210 dniach dojrzewania oraz wyliczoną zawartość pustek powietrznych w próbce do objętości całej próbki. Wielkość badanej próbki z rysą pośrodku wynosiła 40×40×40 mm.

W przypadku zapraw z każdym z badanych składów spoiwa obserwuje się zmniejszenie objętości rysy w czasie 210 dni. Zaprawy Z2, Z7 i Z8 osiągają redukcję objętości rysy większą niż 30%, natomiast Z4 ok. 2%. Dodatkowo w zaprawach Z7 i Z8 wystąpiło zmniejszenie (1%) zawartości pustek powietrznych, co może świadczyć o lepszym zamykaniu pęknięć, mniejszej porowatości zależnej od zawartości cementu CSA i metahaloizytu (15% i 20%). Wyniki badań wykazały, że w próbkach, w których objętość rys zmniejszyła się najbardziej (o ok. 30%), występuje największe względne zwiększenie prędkości fali ultradźwiękowej. Na rysunku 4 przedstawiono obraz próbki z tomografii komputerowej po wykonaniu rysy (rysunek 4a) i po 210 dniach dojrzewania w wodzie (rysunek 4b). Uzyskany w tomografii komputerowej obraz rysy pozwala na określenie stopnia jej wypełnienia. Zamieszczona, obok obrazu próbki, barwna skala pozwala na przybliżone określenie objętości rysy, która po wykona-

The results of CT mortar tests in CT and from the ultrasonic method showed a decrease in crack volume over a period of 210 days and demonstrate the influence of the binder composition on this process.

Figure 5 shows an example of a diffractogram of Portland cement grout with the addition of meta-haloisite and calcium sulfoaluminate cement after 90 days of curing in water. The hydration products are mainly ettringite, as well as stratlingite, AFt solid solutions, and calcite. The literature [17, 18] also shows that similar

hydration products were found in the case of a binder containing metakaolinite and calcium sulfoaluminate cement. The hydration products that are formed may be responsible for the filling and self-growth of the cracks, and confirmation of this will be visualised by scanning microscopy coupled with microarea X-ray analysis.

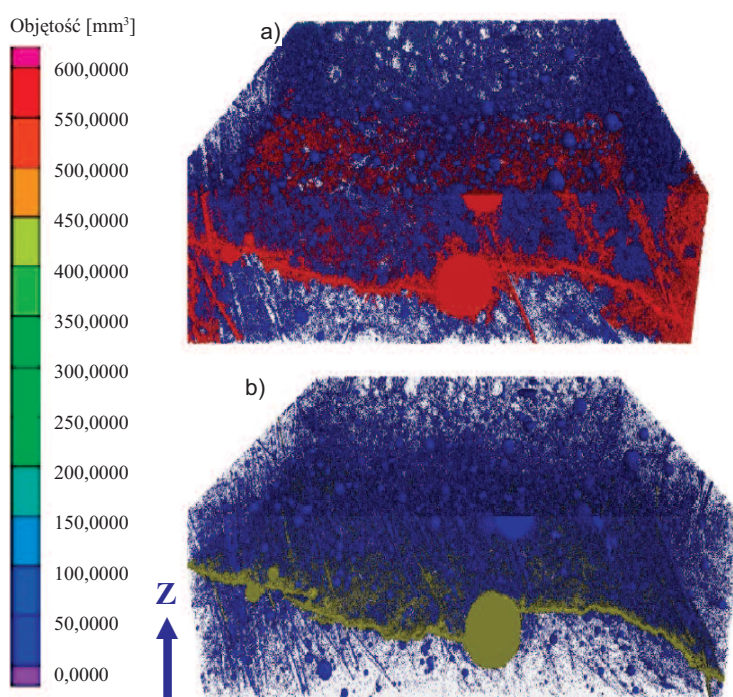


Fig. 4. CT image of the specimen: a) after scratching; b) after 210 days of curing in water for mortar Z8(2)

Rys. 4. Obraz próbki zaprawy Z8(2) z tomografii komputerowej: a) po zarysowaniu; b) po 210 dniach dojrzewania w wodzie

niu miała ok. 600 mm³, a po 210 dniach dojrzewania próbek ok. 400 mm³. Wyniki badań zapraw w tomografii komputerowej i z metody ultradźwiękowej wykazały zmniejszenie objętości rys w czasie 210 dni i wykazują wpływ składu spoiwa na ten proces.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy dyfraktogram zaczynu cementu portlandzkiego z dodatkiem metahaloizytu i cementu wapniowo siarczanoglinianowego po czasie 90 dni dojrzewania w wodzie. Produktami hydratacji są głównie ettringit, a także stratlingit, roztwory stałe AFt i kalcyt. Z literatury [17, 18] wynika także, że w przypadku spoiwa zawierającego metakaolinit i cement wapniowo siarczanoglinianowy występowały podobne produkty hydratacji. Powstające produkty hydratacji mogą być odpowiedzialne za wypełnienie i samozarastanie rys, a potwierdzenie tego faktu zostanie zobrazowane metodą mikroskopii skaningowej sprzężonej z analizą rentgenowską w mikroobszarze.

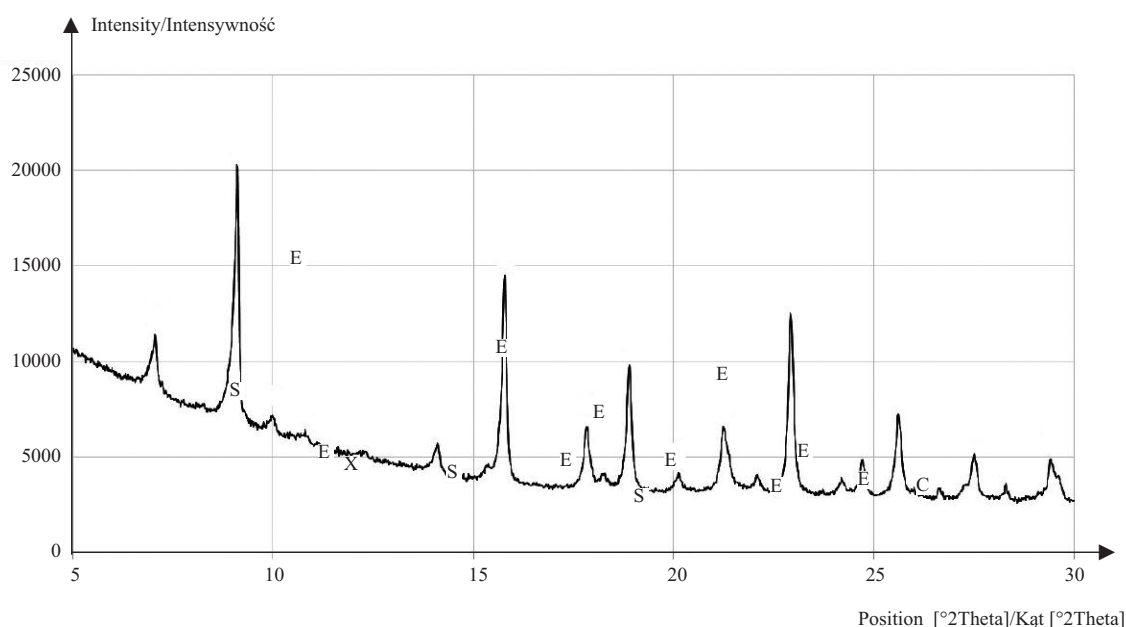


Fig. 5. Diffractogram of the slurry after 90 days of curing in water. Designations: S – stratlingite; E – ettringite; C – calcite, and X – AFt solid solutions

Rys. 5. Dyfraktogram zaczynu po 90 dniach dojrzewania w wodzie. Oznaczenia: S – stratlingit; E – ettringit; C – kalcyt; X – roztwory stałe AFt

Conclusions

The results of the study showed that:

- the composition of the binder containing the addition of calcium sulfoaluminate cement CSA and metahalloysite influences the speed of the passage of the ultrasonic wave through the scratched mortar samples during 210 days of maturation;
- the content of 30% and 40% calcium sulfoaluminate cement (CSA) and 15% and 20% metahalloysite in the binder has the greatest impact on increasing the speed of ultrasonic wave propagation in mortars and reducing the volume of cracks over time;
- X-ray analysis of the binder slurry with the addition of metahalloysite and calcium sulfoaluminate cement showed that the hydration products are ettringite, stratlingite, solid Aft solutions and calcite;
- the use of ultrasonic wave propagation and computed tomography methods may be useful in determining the optimal composition of the binder for filling cracks in concrete.

Received: 10.02.2025

Revised: 28.04.2025

Published: 21.08.2025

Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że:

- skład spoiwa zawierającego dodatek cementu wapniowo siarczanoglinianowego CSA oraz metahaloizytu ma wpływ na prędkość przechodzenia fali ultradźwiękowej przez zarysowane próbki zapraw w czasie 210 dni dojrzewania;
- zawartość 30 i 40% cementu wapniowo siarczanoglinianowego CSA oraz 15 i 20% metahaloizytu w spoiwie wpływa w największym stopniu na wzrost prędkości przechodzenia fali ultradźwiękowej w zaprawach oraz zmniejszenie objętość rys w czasie;
- analiza rentgenowska zaczynu spoiwa z dodatkiem metahaloizytu i cementu wapniowo siarczanoglinianowego wykazała, że produktami hydratacji są ettringit, a także stratlingit, roztwory stałe Aft i kalcyt;
- zastosowanie metod przechodzenia fali ultradźwiękowej i tomografii komputerowej może być przydatne w ustaleniu optymalnego składu spoiwa do zarastania rys w betonie.

Artykuł wpłynął do redakcji: 10.02.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 28.04.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] Huang H, Ye G, Damidot D. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2014; t. 60, s. 68 – 82.
- [2] Pang B, Zhou Z, Hou P, Du P, Zhang L, Xu H. Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; t. 107, s. 191 – 202.
- [3] Van Tittelboom K, De Belie N. Self-Healing in Cementitious Materials – A Review. *Materials*. 2013; t. 6, nr 6, s. 2182 – 2217.
- [4] Lin X, W. Li W, Castel A, Kim T, Huang Y, i Wang K. A comprehensive review on self-healing cementitious composites with crystalline admixtures: Design, performance and application. *Construction and Building Materials*. 2023; t. 409, s. 134108.
- [5] Qureshi T.S, Al-Tabbaa A. Self-healing of drying shrinkage cracks in cement-based materials incorporating reactive MgO, *Smart Mater. Struct.* 2016; t. 25, nr 8, s. 084004.
- [6] Jiang Z, Li W, Yuan Z. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials, *Cement and Concrete Composites*. 2015; t. 57, s. 116 – 127.
- [7] Fronczyk J, Janek M, Szeląg M, Pyzik A, Franus W. Immobilization of (bio-) healing agents for self-healing concrete technology: Does it really ensure long-term performance. *Composites Part B: Engineering*. 2023; t. 266, s. 110997.
- [8] Gołaszewski J, Gołaszewska M. Properties of mortars with Calcium Sulfoaluminate cements with the addition of Portland cement and limestone. *Archives of Civil Engineering*. 2021; s. 425–435.
- [9] Owsiaak Z, Szczukutowicz K. Physical and mechanical properties of meta-halloysite-based geopolymer mortars, *Cement Wapno Beton*. 2024; t. 28, nr 5, s. 351 – 361.
- [10] Ruan S, Qiu J, Yang EH, Unluer C. Influence of crack width on the stiffness recovery and self-healing of reactive magnesia-based binders under CO₂ – H₂O conditioning. *Construction and Building Materials*. 2021; t. 269, s. 121360.
- [11] Hung CC, Su YF. Medium-term self-healing evaluation of Engineered Cementitious Composites with varying amounts of fly ash and exposure durations. *Construction and Building Materials*. 2016; t. 118, s. 194 – 203.
- [12] Jacobsen S, Sellevold EJ. Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw, *Cement and Concrete Research*. 1996; t. 26, nr 1, s. 55 – 62.
- [13] Łukowski P. Współczesne domieszki uszczelniające i wspomagające samozaleczanie betonu. *Budownictwo, Technologie, Architektura*. 2020; t. 1, s. 64 – 66.
- [14] Frei R, McWilliam R, Derrick B, Purvis A, Tiwari A, Serugendo GDM. Self-Healing and Self-Repairing Technologies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013; t. 69, s. 1033 – 1061.
- [15] PN-EN 196-1:2016-07. Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.
- [16] PN-EN 12504-4:2005, *Badania betonu. Część 4. Oznaczenie prędkości fali ultradźwiękowej*.
- [17] Saikia N, Usami A, Kato S, Kojima T. Hydration Behaviour of Eo-cement in Presence of Metakaolin. *Resour. Process.* 2004. DOI: 10.4144/rpsj.51.35.
- [18] Zhou Y et. al.: Influence of metakaolin and calcined montmorillonite on the hydration of calcium sulphoaluminate cement. *Case Stud. Constr. Mater.* 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01104.