

prof. dr hab. inż. Zdzisława Owsiak¹⁾

ORCID: 0000-0002-9278-912X

dr inż. Wioletta Grzmil¹⁾

ORCID: 0000-0001-9362-8224

mgr inż. Magdalena Tutaj-Dudała^{1)*}

ORCID: 0009-0006-9871-4870

mgr inż. Małgorzata Durlej¹⁾

ORCID: 0000-0002-6755-1283

The influence of metahalloysite and CSA cement on the self-healing of cracks in cementitious composites cured in calcium hydroxide

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

DOI: 10.15199/33.2026.05.01

Abstract. The use of cementitious binder with expansive or pozzolanic properties allows partial or complete self-sealing of cracks in cementitious composites. Modification of the composition of the cementitious binder leads to increased effectiveness of self-healing mechanisms in concrete. The aim of the study was to evaluate the effect of adding metahalloysite and calcium sulfoaluminate cement to Portland cement on the self-healing of cracks in cement mortars maturing in a calcium hydroxide solution. The results of the research showed that the use of 10 – 20% metahalloysite and 30% CSA cement in the binder has the greatest effect in reducing the volume of cracks in cementitious composites maturing in calcium hydroxide solution.

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

Crack formation in concrete is inevitable and adversely affects its durability and service life, which, in the era of environmental protection, are key elements of sustainable construction [1, 2]. For this reason, technologies are emerging that allow the self-repair of building materials, helping to reduce environmental pollution and minimise the carbon footprint [3, 4]. **Self-healing processes**, according to one of many definitions, can be divided into natural, so-called autogenous processes, utilising typical components of building materials, and **autonomous** processes involving special materials added to concrete [5, 6]. Self-healing may be influenced by environmental conditions [7, 8]. In [9], the effect of the binder used on the self-healing of cracks in cement composites curing in water is described.

The high pH of concrete is a natural characteristic that is mainly the result of cement hydration. Calcium hydroxide released during hydration into concrete pores makes the solution alkaline and creates conditions for precipitation of calcium carbonate precipitation, which allows cracks to self-heal [7, 10]. For this reason, concrete storage in a saturated

Streszczenie. Zastosowanie spoiwa cementowego o właściwościach pucolanowych lub ekspansywnych umożliwia częściowe lub całkowite samozamykanie rys w kompozytach cementowych. Modyfikacja składu spoiwa cementowego prowadzi do zwiększenia efektywności mechanizmów samonaprawczych w betonie. Celem badań była ocena wpływu dodatku metahaloizytu i cementu wapieniowo-siarczanoglinianowego do cementu portlandzkiego na samozarastanie rys w zaprawach cementowych dojrzewających w roztworze wodorotlenku wapnia. Wyniki badań wykazały, że zastosowanie w spoiwie 10 – 20% metahaloizytu oraz cementu CSA w ilości 30% wpływa w największym stopniu na zmniejszenie objętości rys w kompozytach cementowych dojrzewających w roztworze wodorotlenku wapnia.

Słowa kluczowe: kompozyty cementowe; samozarastanie rys; metahaloizyt; cement wapieniowo-siarczanoglinianowy CSA.

Powstawanie rys w betonie jest nieuniknione i niekorzystnie wpływa na jego trwałość oraz czas eksploatacji, które w dobie ochrony środowiska naturalnego są kluczowym elementem budownictwa zrównoważonego [1, 2]. Z tego względu pojawiają się technologie umożliwiające samonaprawę materiałów budowlanych, mające wpływ na ograniczenie zanieczyszczeń środowiska i minimalizację śladu węglowego [3, 4]. **Procesy samoleczenia**, wg jednej z wielu definicji, **można podzielić na naturalne, tzw. autogeniczne**, z wykorzystaniem typowych składników materiałów budowlanych oraz **autonomiczne** ze specjalnymi materiałami dodawanymi do betonu [5, 6]. Na samonaprawę mogą mieć wpływ warunki otaczającego środowiska [7, 8]. W pracy [9] opisano wpływ zastosowanego spoiwa na samoleczenie pęknięć w kompozytach cementowych dojrzewających w wodzie.

Wysokie pH betonu to jego naturalna cecha, wynikająca przede wszystkim z hydratacji cementu. Uwalniany podczas hydratacji wodorotlenek wapnia w porach betonu nadaje odczyn zasadowy roztworowi i stwarza warunki do wytrącania węglanu wapnia, umożliwiającego samozarastanie pęknięć [7, 10]. Z tego powodu przechowywanie betonu w nasyconym roztworze $\text{Ca}(\text{OH})_2$ powinno zapobiegać wypłukiwaniu składników cementu oraz umożliwiać późniejszą hydratację ce-

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury

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

Ca(OH)₂ solution should prevent leaching of cement components and allow subsequent cement hydration, thus promoting the self-healing processes of composites [5].

The purpose of the study presented in this article was to evaluate the effect of the composition of a cementitious binder containing metahalloysite and calcium sulfoaluminate cement on crack self-healing in cementitious composites cured in a saturated calcium hydroxide solution.

Materials and methods

A five-point experimental design was used to determine the composition of the binder (Figure 1). The binder contained 30, 40, and 50% CSA cement, 10, 15, and 20% metahalloysite, with Portland cement making up the remainder to 100%. Metahalloysite was obtained by calcining haloizyte from the “Dunino” mine for two hours at a temperature of 750°C. To ensure the integration of the samples, steel fibres 12.5 mm long and 0.20 mm in diameter were added to the mortar at a rate of 1% by volume of the mortar. The water-to-binder ratio for all mortars was 0.45, and the aggregate content was 931 kg/m³. The content of CEM I, CSA, and metahalloysite in the binders of mortars Z1–Z5 is shown in Figure 2. The samples were prepared according to the PN-EN 196-1:2016-07 standard [11] and stored under laboratory conditions at a relative humidity of >95%, and after demolding, for 6 days in water. After this time, a crack was induced during the bending test by applying a concentrated force in the midspan of the mortar beam until a crack appeared. The stresses causing the cracks, relative to the stresses after exceeding the maximum limit state, ranged from 34.40% to 44.26%. After cracking, the samples were cured in a calcium hydroxide solution, in sealed containers placed in a chamber filled with nitrogen, ensuring isolation from air due to the possibility of CO₂ absorption.

To determine the parameters of the resulting cracks, the samples were scanned using a computed tomography (CT) scanner and changes in the ultrasonic wave transit time were measured according to the PN-EN 12504-4:2005 standard [12] using a concrete scanner. The mortar beams were then cured in a calcium hydroxide solution and the samples were rescanned using a CT scanner after 90 and 600 days. Measurements of changes in ultrasonic wave propagation

mentu, sprzyjając tym samym procesom samoleczenia kompozytów [5].

Celem pracy zaprezentowanej w artykule była ocena wpływu składu spoiwa cementowego zawierającego dodatki metahaloizytu i cementu wapniowo-siarczanoglinianowego na samozarastanie rys w kompozytach cementowych, dojrzewających w nasyconym roztworze wodorotlenku wapnia.

Materiały i metody badań

Do ustalenia składu spoiwa zastosowano pięciopunktowy plan eksperymentu (rysunek 1). Spoiwo zawierało cement CSA w ilości 30, 40, 50%, metahaloizyt w ilości 10, 15, 20%, a cement portlandzki stanowił dopełnienie do 100%. Metahaloizyt otrzymano przez dwugodzinne prażenie haloizytu z kopalni „Dunino” w temperaturze 750°C. W celu zapewnienia integracji próbek, do zaprawy dodano włókna stalowe o długości 12,5 mm i średnicy 0,20 mm w ilości 1% objętości zaprawy. Stosunek wodno-spoiwowy wszystkich zapraw wynosił 0,45, a ilość kruszywa 931 kg/m³. Zawartość CEM I, CSA i metahaloizytu w zaprawach Z1–Z5 przedstawiono na rysunku 2. Próbkę wykonano zgodnie z PN-EN 196-1:2016-07 [11] 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 34,40 – 44,26%. Po wykonaniu rys próbki dojrzewały w roztworze wodorotlenku wapnia, w zamkniętych pojemnikach umieszczonych w komorze wypełnionej azotem, zapewniającej izolowanie przed dostępem powietrza ze względu na możliwość absorpcji CO₂.

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 [12], stosując betonoskop. Następnie beleczki zapraw dojrzewały w roztworze wodorotlenku wapnia, a ponowne skanowanie próbek w tomografii komputerowej wykonano po 90 i 600 dniach. Pomiary zmiany

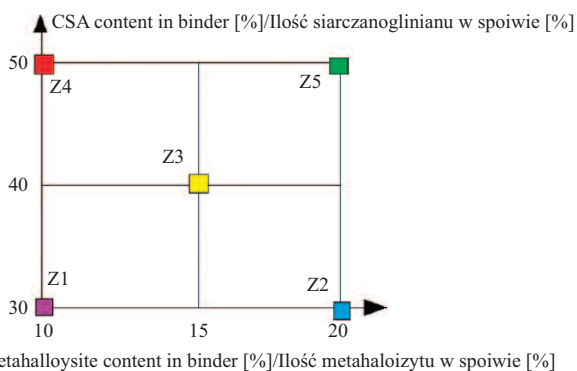


Fig. 1. Experimental design used to determine the composition of the mortar mix

Rys. 1. Plan eksperymentu, wg którego ustalono skład mieszanek zapraw

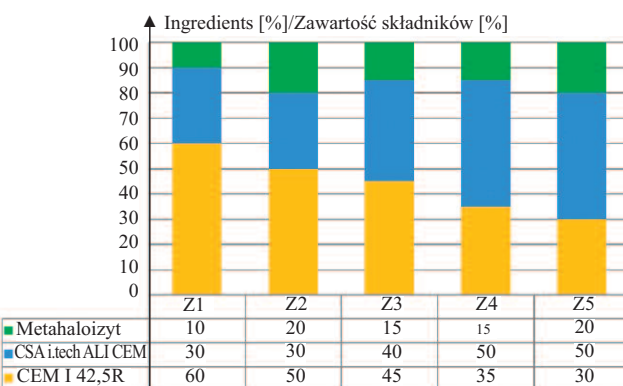


Fig. 2. Composition of the components of the binder in mortars Z1–Z5

Rys. 2. Zawartość składników spoiwa w zaprawach Z1–Z5

velocity were made from the time of cracking (from 30 to 600 days). The same samples that were examined on the CT scanner were analysed. The tests were carried out on three samples from each series.

To determine the composition of the hydration products, XRD analyses were performed on the slurries with the same binder composition as in the mortars. Slurries were stored in calcium hydroxide for 90 days. A Cu-anode diffractometer was used. The measurement was performed in the 2θ range from 5 to 70° , at a scan rate of $3.3^\circ/\text{min}^{-1}$. The phase composition analysis of the binders was performed using the ICDD PDF-2 database.

Results and discussion

Figure 3 shows the variation in the propagation velocity of an ultrasonic wave in the scratched samples, while Figure 4 shows the variation in the propagation velocity of an ultrasonic wave in the unscratched samples (controls) as a function of the ageing time in calcium hydroxide.

As the curing time increases, the speed of ultrasonic wave propagation increases in both control samples and the scratched samples, which may be due to the hydration of the binder and the 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, indicating that the cracks are filled by the hydration products of the binder. This phenomenon is consistent with the autogenous mechanism involving further hydration and the precipitation of secondary hydration products, as described in the literature [13].

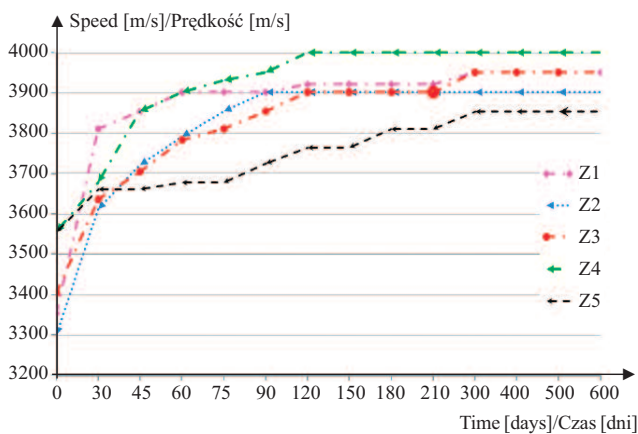


Fig. 3. Changes in the velocity of the ultrasonic wave propagation in mortar samples with cracks as a function of the curing time in calcium hydroxide

Rys. 3. Zmiany prędkości przechodzenia fali ultradźwiękowej w przypadku próbek zapraw z rysami w zależności od czasu dojrzewania w wodorotlenku wapnia

Figure 5 shows the relative change in the velocity of ultrasonic waves in the composite after varying the curing times in calcium hydroxide, relative to the velocity in the same type of mortar immediately after preparation. The results of ultrasonic wave velocity tests indicate that the degree to which cracks are filled with hydration products is influenced by the addition of metahalloysite and calcium sulfoaluminate cement to the cement. During the first 30 days, an increase in the

prędkości przechodzenia fali ultradźwiękowej wykonywano od czasu zarysowania (od 30 do 600 dnia). Analizie poddano te same próbki, które były badane w tomografii. Badania przeprowadzono na trzech próbkach z każdej serii.

W celu określenia składu produktów hydratacji przeprowadzono analizy XRD zaczynów o takim samym składzie spoiwa jak w zaprawach. Zaczyny były przechowywane w wodorotlenku wapnia przez 90 dni. Zastosowano dyfraktometr z anodą Cu. Badanie wykonano w zakresie kątowym 2θ od 5 do 70° , przy kroku $3,3^\circ/\text{min}^{-1}$. Analizę składu fazowego spoiw wykonano z zastosowaniem bazy danych ICDD PDF-2.

Wyniki badań i ich omówienie

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmiany prędkości przechodzenia fali ultradźwiękowej w próbkach zarysowanych w zależności od czasu dojrzewania w wodorotlenku wapnia, a na rysunku 4 w próbkach niezarysowanych (świadkach).

Wraz z czasem dojrzewania zwiększa się prędkość przechodzenia fali ultradźwiękowej zarówno w próbkach świadkach, jak i próbkach z wytworzoną rysą, co może 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 świadczy o wypełnieniu rys przez produkty uwodnienia spoiwa. Zjawisko to jest zgodne z mechanizmem autogenicznym polegającym na dalszej hydratacji oraz wytrącaniu wtórnych produktów hydratacji, opisanym w literaturze [13].

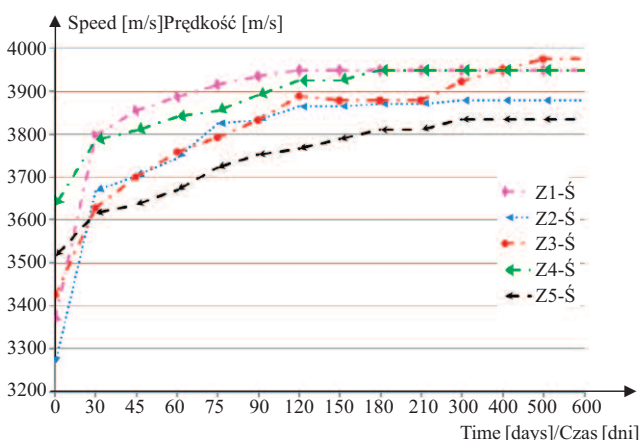


Fig. 4. Changes in the velocity of the ultrasonic wave propagation in uncracked mortar samples (controls) as a function of the curing time in calcium hydroxide

Rys. 4. Zmiany prędkości przechodzenia fali ultradźwiękowej w przypadku próbek zapraw niezarysowanych (świadków) w zależności od czasu dojrzewania w wodorotlenku wapnia

Na rysunku 5 przedstawiono względną zmianę prędkości fal ultradźwiękowych w kompozycie po różnym czasie dojrzewania w wodorotlenku wapnia, odniesioną do tej prędkości w tym samym rodzaju zaprawy bezpośrednio po wykonaniu rys. Wyniki badania prędkości fal ultradźwiękowych wskazują, że na stopień wypełnienia rys produktami hydratacji ma wpływ zastosowanie dodatku metahalloysytu i cementu wapieniowo-siarczanoglinianowego do cementu. W pierwszych trzy-

relative ultrasonic wave velocity is observed of several percent, and after approximately 90 days of curing, the rate of increase stabilises. Mortars Z1 and Z2, containing 10% and 20% metahalloysite, respectively, and 30% calcium sulfoaluminate cement, exhibited high wave velocities. Over 600 days, the wave velocity for mortar Z2 increased by 19.2%, for mortar Z1 by approximately 17.2%, and for mortar Z3 by approximately 16.1% relative to its value in the samples

immediately after cracking. The smallest change in wave velocity was observed for mortars Z4 and Z5 with a binder containing 50% CSA and 10% and 20% metahalloysite, respectively. This change amounted to approximately 8.5% relative to the velocity immediately after cracking.

The photograph shows CT images of the samples taken immediately after the scratch was made (1), after 90 days (2), and after 600 days (3) of ageing in calcium hydroxide. The CT image of the scratch allows for the determination of the degree to which it has filled. The colour scale next to the sample image allows an approximate determination of the crack volume, which, immediately after creation, was approximately

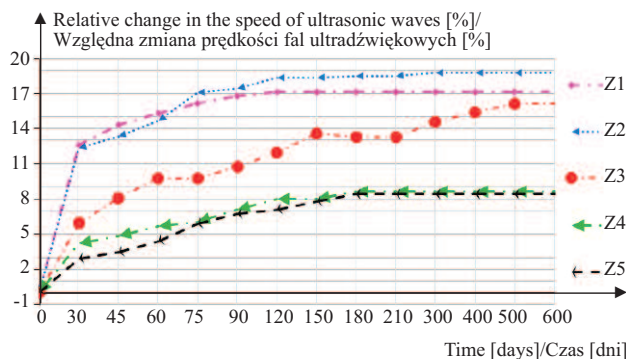


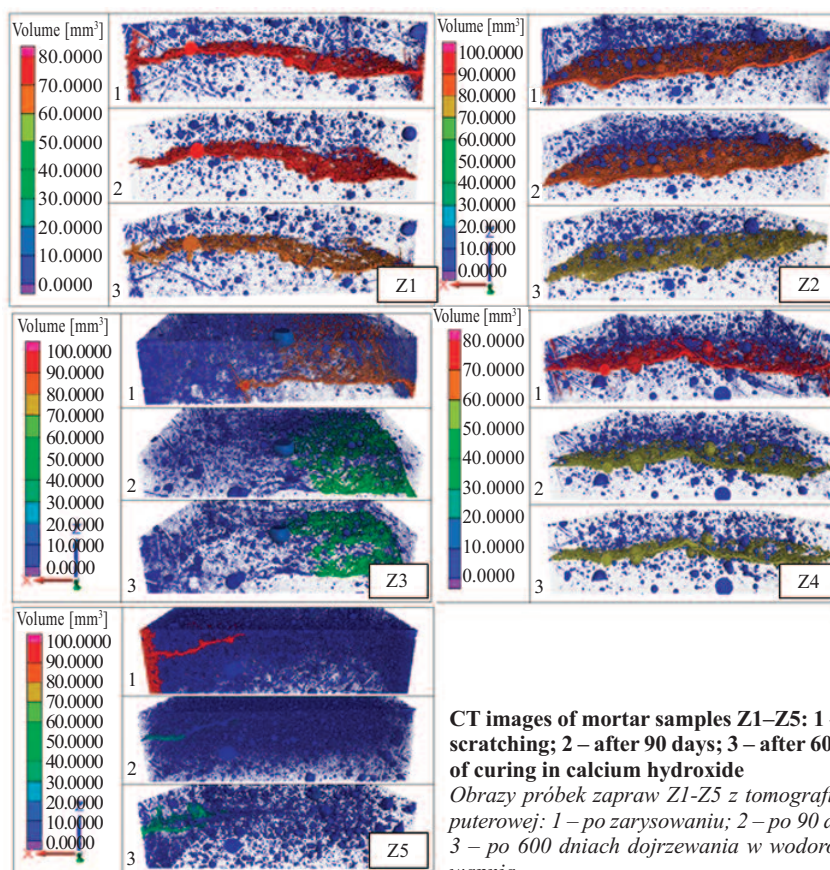
Fig. 5. Relative changes in the velocity of ultrasonic waves in mortar samples during curing in calcium hydroxide

Rys. 5. Względne zmiany prędkości fal ultradźwiękowych w próbkach zapraw w czasie dojrzewania w wodorotlenku wapnia

dziestu dniach obserwuje się zwiększenie względnej prędkości fali ultradźwiękowej o kilka procent, a po ok. 90 dniach dojrzewania następuje stabilizacja tempa jej wzrostu. Zaprawy Z1, Z2 z dodatkiem 10 i 20% metahaloizytu oraz 30% cementu wapniowo-siarczanoglinianowego cechowały się dużą prędkością fal. W ciągu 600 dni prędkość fal zaprawy Z2 zwiększyła się o 19,2%, zaprawy Z1 o ok. 17,2%, a zaprawy Z3 o ok. 16,1% w odniesieniu

do jej wartości w próbkach bezpośrednio po zarysowaniu. Najmniejszą zmianę prędkości fal zaobserwowano w przypadku zapraw Z4 i Z5 ze spoiwem zawierającym 50% CSA oraz dodatek metahaloizytu w ilości odpowiednio 10 i 20%. Zmiana ta wynosiła ok. 8,5% w stosunku do prędkości po powstaniu rys.

Na fotografii przedstawiono obrazy próbek z tomografii komputerowej po wykonaniu rysy (1), po 90 dniach (2) i po 600 dniach (3) dojrzewania w wodorotlenku wapnia. 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 wykonaniu miała odpowiednio: ok. 80 mm³ w przypad-



CT images of mortar samples Z1–Z5: 1 – after scratching; 2 – after 90 days; 3 – after 600 days of curing in calcium hydroxide

Obrazy próbek zapraw Z1–Z5 z tomografii komputerowej: 1 – po zarysowaniu; 2 – po 90 dniach; 3 – po 600 dniach dojrzewania w wodorotlenku wapnia

80 mm³ for mortar Z1, and after 600 days of curing, approximately 60 mm³; for mortar Z2, approximately 90 and 70 mm³; mortar Z3 – 80 and 40 mm³; Z4 – 80 and 50 mm³; mortar Z5 – 100 and 30 mm³.

For mortars with each of the tested binder compositions, a reduction in crack volume was observed at 90 and 600 days. A systematic reduction in crack volume occurred during the healing period (Figure 6), although the extent of this phenomenon depended on the mortar composition.

In mortar Z1 (30% CSA and 10% metahalloysite), the crack volume decreased slightly: from approximately 80 mm³ initially to approximately 70 mm³ after 600 days (a reduction of only approximately 12% of the original volume). On the contrary, mortars containing higher amounts of metahalloysite and CSA than mortar Z1 demonstrated significantly better self-healing of cracks. The greatest effectiveness was observed for the Z5 mortar (50% CSA, 20% metahalloysite). It achieved a reduction in crack volume from approximately 90 to approximately 30 mm³ (approximately 65% self-healing of the cracks). In mortar Z3 (40% CSA, 15% metahalloysite), the crack volume decreased from approximately 90 mm³ initially to approximately 50 mm³ after 3 months and to approx. 40 mm³ after 600 days, corresponding to the closure of approximately 2/3 of the original crack volume. Mortar Z2 (30% CSA, 20% metahalloysite) showed a reduction in crack volume of approximately 35% after 600 days (from approximately 170 mm³ to approximately 155 mm³). In the case of mortar Z4 (50% CSA, 10% metahalloysite), crack closure was less effective. The volume of the cracks decreased from approximately 80 to approximately 65 mm³ or by approximately 18%. It should be noted that mortar Z2 had the largest initial crack volume, which may have hindered its complete sealing. The best results were obtained with a binder composition containing 40 – 50% CSA and 15 – 20% metahalloysite. This confirms earlier observations that the expansive products formed during CSA hydration effectively seal the microstructure, but their effectiveness in filling cracks depends on the available space and the matrix composition [14].

Figure 7 shows an example diffractogram of a Portland cement slurry containing 20% metahalloysite and 30% calcium sulfoaluminate cement after 90 days of curing in calcium hydroxide.

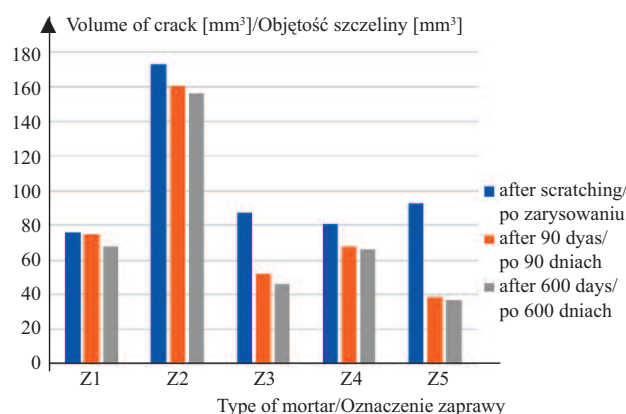


Fig. 6. Crack volume [%] after scratching mortars Z1–Z5: after 90 days and 600 days

Rys. 6. Objętość szczeliny [%] po zarysowaniu zapraw Z1–Z5: po 90 dniach oraz 600 dniach

ku zaprawy Z1, a po 600 dniach dojrzewania próbek ok. 60 mm³; zaprawy Z2 ok. 90 oraz 70 mm³; zaprawy Z3 – 80 oraz 40 mm³; zaprawy Z4 – 80 oraz 50 mm³; zaprawy Z5 – 100 oraz 30 mm³.

W przypadku zapraw o każdym z badanych składów spoiwa obserwuje się zmniejszenie objętości rysy w czasie 90 i 600 dni. Następowala systematyczna redukcja objętości szczelin w czasie regeneracji (rysunek 6), jednak skala tego zjawiska zależała od składu zaprawy.

W zaprawie Z1 (30% CSA i 10% metahaloizytu) objętość rys zmniejszyła się nieznacznie – z ok. 80 mm³ początkowo do ok. 70 mm³ po 600 dniach (zamknięcie jedynie o ok. 12% pierwotnej objętości). Z kolei zaprawy z większą ilością metahaloizytu i CSA niż zaprawa Z1 wykazały znacznie lepsze samonaprawianie pęknięć. Największą skuteczność zanotowano w przypadku zaprawy Z5 (50% CSA, 20% metahaloizytu). Osiągnęła ona redukcję objętości pęknięć z ok. 90 do ok. 30 mm³ (ok. 65% samoistnego wypełnienia szczelin). W zaprawie Z3 (40% CSA, 15% metahaloizytu), objętość szczeliny zmniejszyła się z ok. 90 mm³ początkowo do ok. 50 mm³ po trzech miesiącach, a po 600 dniach do ok. 40 mm³, co odpowiada zamknięciu ok. 2/3 pierwotnej objętości rys. Zaprawa Z2 (30% CSA, 20% metahaloizytu) wykazała po 600 dniach zmniejszenie objętości rys o ok. 35% (z ok. 170 mm³ do ok. 155 mm³). W przypadku zaprawy Z4 (50% CSA, 10% metahaloizytu) zarastanie rys było mniej efektywne. Objętość szczelin zmniejszyła się z ok. 80 do ok. 65 mm³, czyli o ok. 18%. Należy podkreślić, że zaprawa Z2 miała największą początkową objętość rys, co mogło utrudnić ich pełne zasklepienie. Najlepsze rezultaty uzyskano w przypadku składu spoiwa zawierającego 40 – 50% CSA oraz 15 – 20% metahaloizytu. Potwierdza to wcześniejsze obserwacje, że produkty ekspansywne powstające podczas hydratacji CSA efektywnie uszczelniają mikrostrukturę, lecz ich skuteczność w wypełnianiu rys zależy od dostępnej przestrzeni i składu matrycy [14].

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy dyfraktogram zaczynu cementu portlandzkiego z dodatkiem 20% metahaloizytu i 30% cementu wapniowo-siarczanoglinianowego po czasie 90 dni dojrzewania w wodorotlenku wapnia. Produktami hydratacji są przede wszystkim ettringit oraz stratlingit i roztwory stałe Aft. Yelimite (C₄A₃S⁻), będący głównym składni-

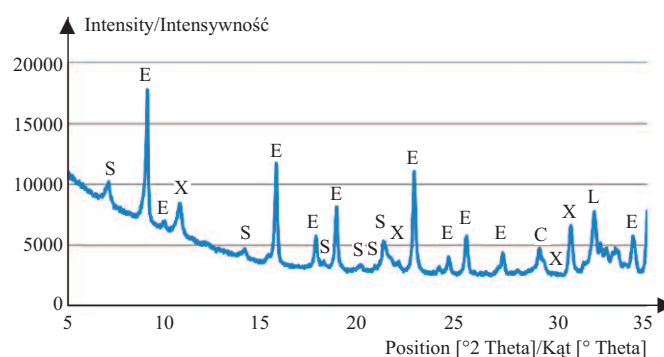


Fig. 7. Diffractogram of the slurry after 90 days of aging in calcium hydroxide: S – stratlingite; E – ettringite, C – calcite; L – larnite, X – solid solutions Aft

Rys. 7. Dyfraktogram zaczynu po 90 dniach dojrzewania w wodorotlenku wapnia: S – stratlingit; E – ettringit; C – kalcyt; L – larnit; X – roztwory stałe Aft

The main hydration products are solid solutions of ettringite, stratlingite, and Aft. Yelimite (C4A3\$), the main component of CSA cement, forms ettringite when it reacts with gypsum in the presence of calcium hydroxide from the hydration of the cement phases, as well as from the surrounding solution. On the contrary, stratlingite is formed as a result of belite hydration in the presence of aluminium hydroxide. Unhydrated Portland cement minerals such as larnite and brownmillerite are also present, as well as a small amount of calcite, which is a product of carbonation. The gel-like products of the pozzolanic reaction of metahalloysite, such as C-S-H and C-A-S-H, are not visible on the X-ray diffractogram after this hydration period. The resulting hydration products may be responsible for crack filling and self-healing. Figure 5 shows the relative change in the velocity of the ultrasonic waves in the composite after various curing times in calcium hydroxide, relative to this velocity in the same type of mortar immediately after preparation.

Conclusions

The results of the study showed that:

- in the scored mortar samples cured in a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution, gradual crack healing was observed, and the rate of healing depends on the binder composition. A partial reduction in crack width occurs in all samples as early as 28 days;
- the self-healing process of cracks in mortars with calcium sulfoaluminate binder and metahalloysite was highest during the first 90 days; no such significant filling occurred within 600 days;
- the curing of cement mortars with a binder containing metahalloysite and CSA cement in a calcium hydroxide solution promotes crack self-healing processes, as confirmed by both the increase in ultrasonic wave velocity (UPV) and the reduction in crack volume observed in computed tomography;
- the primary hydration products are ettringite, stratlingite, and Aft solutions; the resulting hydration products may be responsible for the filling and self-healing of cracks;
- the use of nondestructive testing methods, such as ultrasonic wave velocity measurement and computed tomography, allows for monitoring the crack healing process and may be useful in determining the optimal binder composition.

Received: 07.01.2026

Revised: 24.02.2026

Published: 21.05.2026

kiem cementu CSA, tworzy ettringit w reakcji z gipsem w obecności wodorotlenku wapnia z hydratacji faz cementowych, a także otaczającego roztworu. W wyniku hydratacji belitu w obecności wodorotlenku glinu powstaje natomiast stratlingit. Występują także niezhydratyzowane minerały cementu portlandzkiego larnit i brownmillerit oraz w niewielkiej ilości kalcyt, będący produktem karbonatyzacji. Żelowe produkty reakcji pucolanowej metahaloizytu jako C-S-H i C-A-S-H nie są natomiast widoczne na rentgenogramie po czasie hydratacji. Powstające produkty hydratacji mogą być odpowiedzialne za wypełnienie i samozarastanie rys.

Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że:

- w zarysowanych próbkach zapraw dojrzewających w roztworze $\text{Ca}(\text{OH})_2$ stwierdzono stopniowe zarastanie rys, a szybkość ich wypełnienia zależy od składu spoiwa. Częściowe zmniejszenie szerokości rys występuje we wszystkich próbkach już po 28 dniach;
- proces samozarastania rys w zaprawach ze spoiwem wapieniowo-siarczanoglinianowym i metahaloizytem był największy w pierwszych 90 dniach; w czasie do 600 dni nie występowało tak znaczne ich wypełnienie;
- dojrzewanie zapraw cementowych ze spoiwem zawierającym metahaloizyt i cement CSA w roztworze wodorotlenku wapnia sprzyja procesom samozarastania rys, co potwierdza zarówno zwiększenie prędkości fali ultradźwiękowej (UPV), jak i obserwowana w tomografie komputerowym redukcja ich objętości;
- produktami hydratacji są przede wszystkim ettringit oraz stratlingit i roztwory Aft; powstające produkty hydratacji mogą być odpowiedzialne za wypełnienie i samozarastanie rys;
- zastosowanie metod badań nieniszczących, takich jak pomiar prędkości fali ultradźwiękowej i tomografii komputerowej pozwala na śledzenie procesu zarastania rys i może być przydatne w ustaleniu optymalnego składu spoiwa.

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.01.2026 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 24.02.2026 r.

Opublikowano: 21.05.2026 r.

Literatura

- [1] Roque BAC i in. Self-Healing Concrete: Concepts, Energy Saving and Sustainability. *Energies*. 2023. DOI: 10.3390/en16041650.
- [2] Lu D, Jiang X, Zhang Y, Zhang S, Lu G, Leng Z. A state-of-the-art review of the development of self-healing concrete for resilient infrastructure. *Front. Struct. Civ. Eng.* 2024. DOI: 10.1007/s11709-024-1030-1.
- [3] Czarniecki L, Kurdowski W. Tendencje kształtujące przyszłość betonu. *Budownictwo, Technologie, Architektura*. 2007; 1: 50 – 55.
- [4] Ferrara L. Self-healing cement-based materials: an asset for sustainable construction industry. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/442/1/012007.
- [5] Amran M i in. Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review. *Materials*. 2022. DOI: 10.3390/ma15093214.
- [6] Qian SZ, Zhou J, Schlagen E. Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. *Cement and Concrete Composites*. 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.015.
- [7] Silva DMGD, Cappellesso VG, Garcia MGL, Masuero AB, Molin DCCD. Calcium hydroxide influence in autogenous self-healing of cement-based materials in various environmental conditions. *Ambient. constr.* 2021. DOI: 10.1590/s1678-86212021000200522.
- [8] Huang H, Ye G. Self-healing of cracks in cement paste affected by additional Ca^{2+} ions in the healing agent. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. DOI: 10.1177/1045389X14525490.
- [9] Owsiak Z, Grzmil W, Tutaj-Dudała M. Influence of metahalloysite and CSA cement on the self-healing of cracks in cementitious composites cured in water. *Materiały Budowlane*. 2025. DOI: 10.15199/33.2025.08.05.
- [10] Roig-Flores M, Moscato S, Serna P, Ferrara L. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials*. 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091.
- [11] PN-EN 196-1:2016-07. Metody badania cementu – Część 1: Oznaczenie wytrzymałości.
- [12] PN-EN 12504-4:2005. Badania betonu. Część 4. Oznaczenie prędkości fali ultradźwiękowej.
- [13] De Belie N i in. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. *Adv Materials Inter*. 2018. DOI: 10.1002/admi.201800074.
- [14] Winnefeld F, Lothenbach B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements – Experimental findings and thermodynamic modelling. *Cement and Concrete Research*. 2010. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.08.014.