

Mgr inż. Piotr Arabczyk¹
Dr inż. Mateusz Techman²
Dr inż. Norbert Olczyk²

Midfortec Sp. z o.o.¹
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie²

Wpływ domieszki krystalizującej na samonaprawę betonu z uwzględnieniem aspektów finansowych i ekologicznych

The influence of crystalline admixture on self-healing of concrete including financial and environmental aspects

Streszczenie

Trwałość konstrukcji stanowi kluczowy aspekt nowoczesnego budownictwa. Niewłaściwy dobór lub zastosowanie materiałów zwiększa koszty z napraw i utrzymaniem obiektów. Jednym z nowoczesnych rozwiązań poprawiających trwałość konstrukcji jest stosowanie domieszek krystalizujących, które powodują, że beton wykazuje właściwości samonaprawy. Technologia ta, znana i stosowana od dekad w ponad 40 krajach świata, od kilku lat dynamicznie rozwija się również w Polsce, znajdując zastosowanie w licznych projektach (np. obiekty infrastrukturalne, zbiorniki retencyjne). Artykuł zawiera przegląd literatury oraz wyniki badań własnych wpływu jednej z dostępnych na polskim rynku domieszek krystalicznych Krystaline ADD1 na parametry mieszanek betonowych i stwardniałego betonu. Przeprowadzono badania kalorymetryczne oraz mikroskopowe, a także oceniono zdolność materiału do autogenicznego zasklepiania rys w czasie. Dodatkowo oceniono aspekty ekonomiczne i ekologiczne zastosowania domieszki krystalicznej dla przykładowej obiektu. Wyniki badań wykazały pozytywny wpływ domieszki krystalizującej na obniżenie ciepła hydratacji. Ponadto, beton z domieszką wykazał zdolność do całkowitego zasklepiania rys. Zastosowanie domieszki krystalizującej pozwala na obniżenie kosztów wykonania inwestycji oraz potencjalnej naprawy oraz obniża wpływ inwestycji na środowisko.

Abstract

The durability of concrete structures is a key aspect of modern construction. Improper selection or application of materials leads to increased maintenance and repair costs. One of the innovative solutions that enhances the durability of concrete structures is the use of crystallizing admixtures, which impart self-healing properties to concrete. This technology, known and applied for decades in over 40 countries worldwide has also been developing dynamically in Poland in recent years, finding application in numerous projects (e.g., infrastructure facilities, retention tanks). This article presents a literature review and the results of original research on the influence of one of the crystallizing admixtures available on the Polish market—Krystaline ADD1—on the properties of concrete mixes and hardened concrete. Calorimetric and microscopic tests were conducted, as well as an evaluation of the material's ability to autogenously

heal cracks over time. Additionally, the economic and environmental aspects of using the crystallizing admixture in a sample construction project were assessed.

The research results demonstrated a positive effect of the crystallizing admixture in reducing the heat of hydration. Moreover, the concrete containing the admixture exhibited the ability to completely heal cracks. The use of the crystallizing admixture enables a reduction in both construction and potential repair costs, while also lowering the environmental impact of the investment.

Wstęp

Szczelność konstrukcji żelbetowych stanowi jedno z kluczowych kryteriów decydujących o ich trwałości, bezpieczeństwie użytkowania oraz spełnieniu funkcji użytkowych w obiektach inżynierskich. Szczególne znaczenie ma to w przypadku konstrukcji pracujących w warunkach kontaktu z wodą, takich jak zbiorniki, baseny kąpielowe czy elementy konstrukcyjne znajdujące się poniżej poziomu zwierciadła wody gruntowej. Dla powyższych obiektów obliczeniowe zagwarantowanie bezpieczeństwa użytkowania przez spełnienie stanów granicznych nośności jest niewystarczające. Wysokie wymagania szczelności sprawiają, że spełnienie stanu SGN jest podstawowym i miarodajnym przy określaniu grubości ściany i stopnia jej zbrojenia [1]. W tego rodzaju obiektach szczelność nie jest jedynie kwestią komfortu użytkowania, ale wymogiem technicznym, związanym z koniecznością zapobiegania migracji cieczy oraz agresywnych substancji, które mogłyby doprowadzić do korozji stali zbrojeniowej i degradacji betonu. Pomimo że beton jako materiał charakteryzuje się relatywnie niską przepuszczalnością, to jednak jego naturalna porowatość oraz skłonność do zarysowań czynią go podatnym na wnikanie czynników zewnętrznych.

W praktyce inżynierskiej, w celu zapewnienia szczelności konstrukcji żelbetowych, stosuje się różne techniki hydroizolacyjne, które można podzielić na dwie główne grupy: izolacje zewnętrzne i wewnętrzne (powłokowe) oraz rozwiązania integralne (domieszki do betonu). Do najczęściej wykorzystywanych metod należą: membrany bitumiczne, powłoki polimerowe, folie z tworzyw sztucznych, szlasy mineralne czy iniekcje ciśnieniowe. Metody te wymagają jednak starannego wykonania i często są podatne na uszkodzenia mechaniczne, starzenie się materiału, problemy z przyczepnością czy niewłaściwe przygotowanie podłoża. Dodatkowo, nie zapewniają one trwałości na całym przekroju konstrukcji, lecz działają głównie powierzchniowo.

Z tego względu w konstrukcjach, od których wymagana jest szczelność, projektowanie odbywa się zgodnie z dodatkowymi wymaganiami dotyczącymi ograniczenia szerokości rys. Przepisy normowe, w tym przede wszystkim norma PN-EN 1992-1-1:2008 (Eurokod 2) [2], zawierają szczegółowe wytyczne dotyczące warunków zarysowania konstrukcji żelbetowych. Wymagania te mają na celu ograniczenie propagacji rys, które mogą stanowić drogi wnikania cieczy i prowadzić do utraty szczelności konstrukcji.

Na przykładzie zbiorników można zwrócić uwagę, że za równoważne uznaje się dwa rozwiązania - zapewnienie szczelności z uwagi na strukturę ściany lub zrekomensowanie tego w postaci wyłożenia ścian szczelną okładziną. Za szczelne uznaje się przegrody bez okładzin, gdzie szerokość rozwarcia rysy nie przekracza 0,1 mm.

W odpowiedzi na powyższe ograniczenia, coraz większe zainteresowanie budzi stosowanie domieszek krystalicznych, które umożliwiają tworzenie strukturalnej, trwałej i samouszczelniającej się bariery wodnej w strukturze przegrody [3]. Domieszki

te są dodawane do mieszanki betonowej podczas jej przygotowania, co oznacza, że proces hydroizolacji jest integralną częścią samego materiału. Działanie domieszek krystalicznych opiera się na reakcji chemicznej zachodzącej pomiędzy aktywnymi składnikami domieszki a związkami chemicznymi występującymi w cemencie i wodzie zarobowej. W wyniku tej reakcji tworzą się kryształy, które wypełniają kapilary i mikroszczeliny betonu, blokując migrację cieczy [4].

W artykule przedstawiono wyniki badań dla jednej z dostępnych na polskim rynku domieszki krystalizującej Krystaline ADD1 dostępne w literaturze, rozszerzone o wyniki badań własnych mających na celu przebadanie wpływu zastosowania domieszki na właściwości betonów.

Dodatkowo w artykule podjęto próbę oceny ekonomicznej i uproszczoną analizę wpływu na środowisko różnych rodzajów hydroizolacji, typowych dla konstrukcji żelbetonowych.

Uwarunkowania normowe szczelności konstrukcji

Eurokody, stanowiące podstawę projektowania konstrukcji w Unii Europejskiej, obligują do sprawdzenia stanów granicznych użytkowalności (SGU), w tym kontroli rozwarcia rys. Szczegółowe wymagania dotyczące szczelności konstrukcji mających kontakt z cieczami określa PN-EN 1992-3 [5]. Norma ta wprowadza podział na cztery klasy szczelności, definiujące dopuszczalny poziom przecieków lub zawilgocenia:

- Klasa szczelności 0 – Dopuszczalny jest pewien stopień przecieków lub przecieki nie mają znaczenia dla funkcji konstrukcji.
- Klasa szczelności 1 – przecieki ogranicza się do niewielkiej ilości, miejscowe zawilgocenie lub niewielkie przemakanie powierzchni jest akceptowalne
- Klasa szczelności 2 – Przecieki powinny być minimalne; ewentualne przemakanie nie może powodować widocznych uszkodzeń ani istotnie pogarszać wyglądu konstrukcji.
- Klasa szczelności 3 – Nie dopuszcza się żadnych przecieków (konstrukcja szczelna).

W praktyce inżynierskiej najczęściej projektuje się konstrukcje w klasie 2 lub 3.

W ujęciu normowym [2] kontrola zarysowania może być realizowana na kilka sposobów – poprzez ograniczenie naprężeń w zbrojeniu (metoda pośrednia), weryfikację szerokości rys (metoda bezpośrednia), a także przez dobór odpowiedniej klasy ekspozycji i minimalnego otulenia zbrojenia.

Metoda pośrednia polega na ograniczeniu naprężeń w zbrojeniu do wartości zależnych od: średnicy prętów, charakterystycznej wytrzymałości betonu na rozciąganie, rozstawu prętów. Dla obliczonej maksymalnej średnicy pręta (1) i żądanej granicznej szerokości rysy odczytuje się naprężenia σ_s (Rys 1a). Następnie po określeniu dopuszczalnych naprężeń wyznacza się maksymalny rozstaw prętów zbrojeniowych (Rys 1b). Po otrzymaniu wszystkich danych należy obliczyć zbrojenie minimalne.

$$\Phi_s^* = \frac{\Phi * 2,9 * 10 * (h - d)}{f_{ct,eff} * h} \quad (1)$$

gdzie:

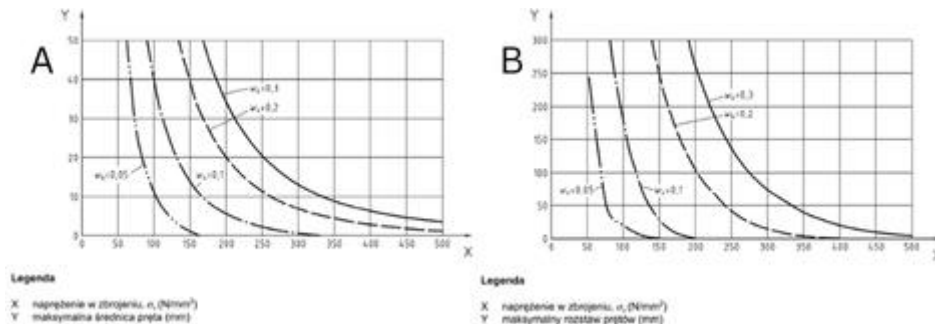
Φ - maksymalna skorygowana średnica pręta;

Φ_s^* - maksymalna średnica pręta;

H - całkowita wysokość przekroju poprzecznego elementu;

d - wysokość użyteczna przekroju.

$f_{ct,eff}$ - efektywna wartość średniej wytrzymałości betonu na rozciąganie



Rys. 1. Maksymalne średnice (A) i rozstawy (B) prętów przy kontroli rys [5]

Metoda bezpośrednia polega na obliczeniu minimalnego pola przekroju zbrojenia ze wzoru (2)

$$A_{s,min} = \frac{k_c * k * f_{ct,eff} * A_{ct}}{\sigma_s} \quad (2)$$

$A_{s,min}$ - minimalne pole przekroju stali zbrojeniowej w strefie rozciąganej;

k - współczynnik zależny od nierównomiernych, samorównoważających się naprężeń;

k_c - współczynnik zależny od rozkładu naprężeń w przekroju;

$f_{ct,eff}$ - średnia wartość wytrzymałości betonu na rozciąganie;

A_{ct} - pole przekroju strefy rozciąganej betonu;

σ_s - wartość bezwzględna maksymalnego dozwolonego naprężenia w zbrojeniu.

Eurokod 2 wskazuje, że w zależności od klasy ekspozycji, dopuszczalna szerokość rys może wynosić od 0,2 mm (dla konstrukcji wymagających wysokiej szczelności, np. zbiorników wodnych) od 0,4 mm (w sytuacji, gdy estetyka nie ma znaczenia). W przypadku konstrukcji wodoszczelnych, dopuszczalne szerokości rys bywają jeszcze bardziej rygorystyczne i wynoszą od 0,05 mm do 0,2 mm. Spełnienie takich wymagań pociąga za sobą konieczność stosowania zwiększonego zbrojenia oraz wzmożonej kontroli jakości wykonania [2].

Tabela 1 Przedstawiono minimalne zużycie stali zbrojeniowej w zależności od dopuszczalnej szerokości rozwarcia rysy. Analizę porównawczą wykonano dla metrowego pasma ściany żelbetowej, o grubości 0,25 cm (4m² ściany przy zużyciu 1 m³ betonu) wykonanej z betonu C30/37, zbrojonego prętami o średnicy 16 mm, ze stali o module sprężystości 200 GPa. Analizę wykonano w oparciu o [2,6] Wartość stopnia zbrojenia podano tylko na 1 kierunku (podłużnym) pracy elementu (zbrojenie górne i dolne łącznie). Zakładając, że zbrojenie elementu będzie dwukierunkowe, np. dla

wielkopowierzchniowych płyt fundamentowych, płyt dennych lub płyt o kształcie zbliżonym do kwadratu, wartości należy podwoić.

Tab. 1. Zestawienie wymaganego zbrojenia dla danego dopuszczalnego zarysowania

Szerokość dopuszczalna rozwarcia rysy	0,1 mm		0,2 mm		0,3 mm		0,4 mm		0,5 mm	
Norma	DIN	EC	DIN	EC	DIN	EC	DIN	EC	DIN	EC
Pole zbrojenia [cm ² /mb]	27,81	34,86	19,66	24,58	16,06	20,07	13,90	17,38	12,44	15,55
Stopień zbrojenia [%]	1,11	1,39	0,78	0,98	0,64	0,80	0,56	0,70	0,50	0,62
Stopień zbrojenia [kg/m ²]	21,83	27,37	15,43	19,30	12,61	15,75	10,91	13,64	9,77	12,21
Stopień zbrojenia [kg/m ³]	87,32	109,46	61,73	77,18	50,43	63,02	43,65	54,57	39,06	48,83

Zmiana warunku SGU dla dopuszczalnej szerokości rysy z 0,1 mm do 0,4 mm pozwala na ograniczenie stopnia zbrojenia dla analizowanego przypadku blisko o połowę. Należy przy tym pamiętać, że przy wykonawstwie cena samego materiału nie jest ceną ostateczną, należy również uwzględnić koszty montażu (robocizny), materiałów dodatkowych (druć wiążątkowy, dystanse zbrojeniowe) oraz transportu, zarówno z zakładu produkcji na plac budowy, jak i transportu pionowego i poziomego w pobliżu miejsca wbudowania.

Dodatkowo, aby zapewnić szczelność zbiornika, prócz przyjętej klasy szczelności oraz spełnienia warunków SGU należy:

- Wykonywać zbiornik ze szczelnego strukturalnie betonu;
- Używać deskowań bezściągowych lub starannie uszczelnić przejścia;
- Podczas betonowania stosować dylatacje skurczowe;
- Uszczelniać przerwy robocze i dylatacyjne;
- Uszczelnić przejścia instalacyjne [1].

Wymienione wyżej wymagania dotyczące konstrukcji o wymaganej szczelności podnoszą znacznie jej koszt, czas wykonania, a także negatywnie wpływają na środowisko generując odpady.

Domieszka krystalizująca ADD1

Jak wspomniano we wstępie, działanie domieszek krystalicznych związane jest z reakcją aktywnych składników domieszki w kontakcie z wodą. Skład domieszek krystalicznych jest objęty często tajemnicą handlową, stąd dokładny opis ich działania jest niemożliwy do określenia. Najczęściej jednak domieszki te powodują wzmożone wytwarzanie się węgla wapnia [7] lub fazy C-S-H [8]. Domieszka ADD1 działa poprzez poprawę procesu hydratacji betonu – zwiększa ilość uwodnionego krzemianu wapnia (C-S-H), a zmniejsza ilość wodorotlenku wapnia. Skutkuje to intensywniejszym tworzeniem większej liczby i większych objętościowo amorficznych żeli oraz stopniowym zagęszczaniem sieci porów i kapilar w betonie. Zastosowanie domieszek opartych na technologii C-S-H prowadzi do ciągłego zmniejszania całkowitej objętości, jak i średniej wielkości porów w ramach ulepszonego procesu hydratacji. Udoskonalona hydratacja będzie przebiegać przez cały okres życia betonu, o ile

obecna jest wilgoć, i stanowi główny mechanizm stymulujący zwiększoną zdolność samonaprawy. Dodanie technologii C-S-H do betonu podnosi jego właściwości, poprawiając parametry użytkowe we wszystkich aspektach, zapewniając większą trwałość, szczelność oraz zrównoważony charakter materiału. Badania pokazują, że wypełnienie rys, w związku z działaniem domieszek krystalicznych może mieć bardziej zwartą strukturę, niż beton znajdujący się obok wypełnionego spękania [9]. Dzięki temu domieszka ADD1 oferuje długotrwałą i aktywną ochronę, nawet w przypadku trudnych warunków eksploatacyjnych.

Naprawa obiektów po kilkunastu latach eksploatacji, wiąże się już z dużym nakładem kosztów z uwagi na niezbędny do wykonania zakres robót takich jak np. odkopanie elementu, usunięcie istniejących powłok, ich utylizacja, aplikacja nowych, zasypanie, przywrócenie zagospodarowania terenu, co często przekracza założony budżet powodując, że prace nie zostają podjęte w odpowiednim czasie, a element popada w dalszą degradację.

Domieszka krystaliczna ADD1 ma postać białego proszku, który dodawany jest do betonu w czasie procesu mieszania. Dozowanie mieszanki wynosi 1 kg/m^3 , co jest unikalnym rozwiązaniem ułatwiającym stosowanie domieszki. Typowo dozowanie ustalane jest w stosunku do masy cementu w betonie. Producent domieszki opisuje ją jako hydrofilowy katalizator krystalizacji, powodujący reakcję chemiczną pomiędzy nieprzereagowanymi cząstkami cementu i wodą, co wytwarza nierozpuszczalne osady krystaliczne [5]. Pozwala to na wypełnienie powstałej rysy, bądź porów, poprawiając trwałość i szczelność betonu. Producent domieszki szczyci się certyfikatem potwierdzającym samonaprawę rys do $0,5 \text{ mm}$ [10], co jest wartością większą niż dla typowych domieszek krystalicznych [11].

W celu poznania wpływu domieszki na właściwości kompozytów cementowych, zestawiono dostępne w literaturze artykuły opisujące bezpośrednio jej działanie.

Calvo et al. [12] przeprowadzili badania wpływu domieszki Krystaline ADD1 na dwóch betonach. Badania pokazały, że zastosowanie domieszki poprawiło urabialność przygotowanego betonu. Zastosowanie ADD1 poprawiło penetrację wody pod ciśnieniem o 49%. Wytrzymałość na ściskanie mieszanki modyfikowanej domieszką krystaliczną wzrosła o około 16%. Badania rozkładu porów, wskazały natomiast na brak znaczących różnic między betonem referencyjnym, a modyfikowanym.

W badaniach przeprowadzonych przez Naidenov et al. [13, 14] przeprowadzono porównanie działania pięciu domieszek krystalicznych dostępnych komercyjnie. Przeprowadzone zostały podstawowe badania mieszanki jak badanie opadu stożka i napowietrzenia. W przypadku badań betonu, wykonano badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, analizę głębokości wody pod ciśnieniem, a także badania mikrostruktury oraz m.in. analizy DTA i BET. Autorzy artykułu zwrócili uwagę na łatwość dozowania mieszanki, która jest stała niezależnie od betonu. Producent wymaga jedynie zastosowania co najmniej 300 kg/m^3 cementu w betonie. W badaniach założono stały poziom opadu stożka (13 cm). Domieszka ADD1 w największym stopniu, ze wszystkich porównywanych, pozwoliła na redukcję wody, przy jednoczesnym uzyskaniu założonej konsystencji. Wyniki badania rozkładu porów, pokazały, że właśnie ta domieszka w największym stopniu obniżyła objętość mikroporów w badanych betonach. Zastosowanie ADD1 przyczyniło się do zwiększenia wytrzymałości na ściskanie o ponad 25%, a także pozwoliło na zmniejszenie penetracji wody o ponad 60%.

W badaniach Ciak et al. [15] przeprowadzono analizę porównawczą wpływu trzech mieszanek ADD znajdujących się w ofercie producenta. Przeprowadzono badania wpływu domieszek na czas wiązania zaczynów cementowych. Zastosowanie domieszki ADD1 wydłużyło początek czasu wiązania o około 12%, przy równoczesnym wydłużeniu końca czasu wiązania o około 20%. Wyniki badań wskazały na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie o około 30% w stosunku do betonu referencyjnego.

Badania własne

Do badań własnych wykorzystano dwie mieszanki betonowe opracowane i wytworzone przez lokalną wytwórnię betonu. Mieszanka referencyjna jest typowym betonem towarowym klasy C30/37. W celu określenia wpływu domieszki Krystaline ADD1 do betonu referencyjnego dodano ją w ilości zalecanej przez producenta (1kg/m^3). Odpowiednie dozowanie domieszki krystalicznej oraz spełnienie wszystkich wymogów producenta jest niezwykle ważne do osiągnięcia założonych parametrów betonu [16]. Obie mieszanki charakteryzowały się klasą konsystencji S4 (opad stożka między 160 mm a 210 mm).

Tab. 2. Skład badanych betonów

Skład		ADD1	REF
		kg/m ³	
1	CEM II/B-S 42,5 N	320	320
2	Master Pozzolith	1,44	1,76
3	Master Polyheed	2,56	2,88
4	Piasek 0/2 mm	705,57	705,31
5	Kruszywo grube. 2-8 mm	464,19	464,02
6	Kruszywo grube. 8-16	687	686,75
7	Woda	160	160
8	Krystaline ADD1	1	

W artykule przedstawiono wybrane badania wpływu domieszki ADD1 na właściwości mieszanek betonowych i betonów.

Przeprowadzono badania kalorymetryczne świeżej mieszanki, wykorzystując do tego kalorymetr adiabatyczny oraz izotermiczny. Określono całkowite ciepło wydzielone przez mieszankę i rozwój temperatury w trakcie dojrzewania. Mieszanki do badania w kalorymetrze adiabatycznym zostały zaformowane w specjalnie do tego przeznaczonych styropianowych formach o wymiarach 15 cm x 15 cm x 15 cm. Próbkę do badania w kalorymetrze izotermicznym zostały przygotowane poprzez odważenie 100 g mieszanki do przystosowanych pojemników i umieszczenie ich w kalorymetrze. Badania kalorymetryczne były prowadzone przez 7 dni.

W celu określenia zdolności do samonaprawy badanych betonów, z próbek walcowych po 56 dniach dojrzewania wycięto plastry o grubości około 1 cm. Powierzchnia próbek badawczych została wyszlifowana przy użyciu węgliku krzemu o różnym gradiencie. Wyszlifowane próbki umieszczono w prasie elektromechanicznej w celu wymuszenia rysy na około 2/3 wysokości przekroju poprzecznego. Następnie próbki zostały zobrazowane przy użyciu mikroskopu optycznego (powiększenie 50x),

w celu określenia stanu pierwotnego po zarysowaniu (0d). Po 14 dniach wykonano ponownie pomiar w celu określenia zakresu zasklepienia się rys.

Na potrzeby przeprowadzenia analizy ekonomicznej i wpływu domieszki ADD1 na środowisko, porównano ją do dwóch przykładowych rozwiązań hydroizolacyjnych dostępnych na polskim rynku: maty bentonitowej (MB) oraz izolacji bitumicznej (KMB). Z uwagi na czysto naukowy charakter analizy pominięto nazwy producentów i produktów.

W ramach analizy ekonomicznej stosowanej domieszki określono jej koszt na 1 m³ betonu i porównano go do kosztu wykonania przykładowych hydroizolacji na 1 m² elementu. Analizę przedstawiono dla elementów o różnej grubości. Przyjęto zużycie i ceny na podstawie ogólnodostępnych kart produktu i ofert cenowych: ADD1 – 1 kg/m³, cena 81 zł/kg MB – 1 m²/1 m², cena 55 zł/m², KMB – 4,8 kg/m², cena 16,25 zł/kg brutto. W analizie przyjęto tylko koszt wymienionych materiałów, bez kosztów akcesoriów niezbędnych do uszczelnienia przerw roboczych (zaleca się stosowanie dla obu wariantów analizy) oraz pomijając koszt robocizny związany z układaniem hydroizolacji.

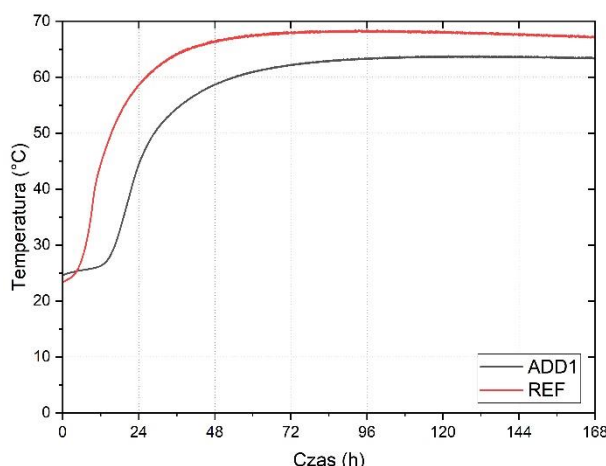
W celu określenia wpływu domieszki na środowisko przeprowadzono uproszczoną analizę LCA. Ze względu na niewielką ilość dostępnych danych [17] oraz często niepełny wymiar określonych w nich wskaźników ekologicznych, autorzy niniejszego artykułu ograniczyli zakres analizy LCA. Analiza skupiała się na wskaźniku „GWP (ang. *Global Warming Potential*) - Globalne ocieplenie CO₂-eq”, obejmującą procesy „od pobrania surowców do bram zakładu” [18]. Wartości dla analizowanych materiałów zostały uzyskane z deklaracji środowiskowych (ang. EPD – *Environmental Product Declaration*) uzyskanych od producentów. Uwzględniono trzy składowe: A1 – dostawa i surowce, A2 – transport, A3 – wytwarzanie, a ich suma była podstawą analizy. Całkowitą wartość wskaźnika dla przykładowego elementu konstrukcyjnego określono na podstawie odczytanych wartości oraz całkowitego zużycia materiału. W analizie LCA pominięto wpływ samego betonu, zakładając, że skład betonu będzie taki sam w każdym przypadku.

Jako przykładową konstrukcję przyjęto ściany garażu podziemnego o wymiarach w planie 60 m x 40 m, wysokości ścian 3,0 m. Zestawienie kosztów przedstawiono dla ścian o zmiennej grubości od 15 cm do 40 cm, w skoku co 5 cm.

Wyniki i dyskusja

Wyniki badania kalorymetrem adiabatycznym przedstawia Rysunek 2. Mieszanka referencyjna (REF) wykazuje szybszy i intensywniejszy wzrost temperatury, osiągając blisko 60 °C w ciągu pierwszych 24 godzin. W tym samym czasie, mieszanka wzbogacona o ADD1 osiągnęła temperaturę około 45 °C. Mieszanka z domieszką uzyskała temperaturę maksymalną niższą o 5 °C od mieszanki referencyjnej.

Widoczne różnice sugerują, że domieszka ADD1 efektywnie spowalnia tempo reakcji hydratacyjnych i redukuje intensywność wydzielanego przez mieszkankę ciepła. Taki efekt jest szczególnie pożądany w zastosowaniach, gdzie zachodzi potrzeba ograniczenia wzrostu temperatury wewnątrz elementów betonowych o dużych wymiarach lub robót prowadzonych w okresie letnim, co pozwala na redukcję ryzyka powstawania spękań termicznych.

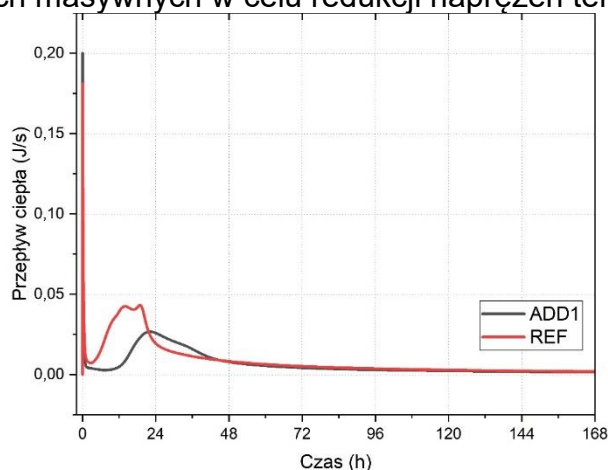


Rys. 2. Wyniki badania kalorymetrem adiabatycznym

Równolegle przeprowadzone zostało badanie w kalorymetrze izotermicznym (Rys. 3). Przebieg wydzielania się ciepła obu mieszanek wskazuje na typowy charakter hydratacji cementu. Wyraźny pik początkowy, odpowiada reakcji wstępnej, po której następuje faza uspienia, a następnie główny pik hydratacyjny związany z intensywnym wytwarzaniem się produktów hydratacji, przede wszystkim C-S-H i ettringitu. Widoczne są jednak wyraźne różnice w intensywności i czasie wystąpienia tych pików, co świadczy o wpływie domieszki ADD1 na kinetykę reakcji hydratacji.

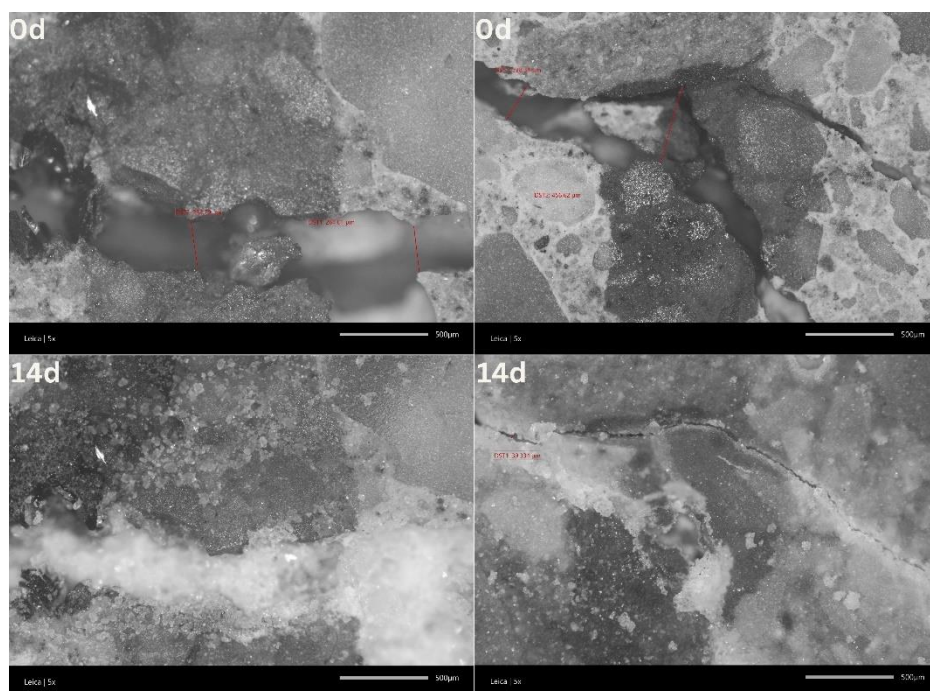
Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują, że ADD1 modyfikuje przebieg hydratacji cementu. Obniżenie temperatury maksymalnej oraz przesunięcie głównego piku potwierdzają działanie typowe dla środków o charakterze opóźniającym, które poprzez adsorpcję jonów Ca^{2+} i modyfikację fazy ciekłej spowalniają narastanie produktów hydratacji [19,20]

Domieszka ADD1 powoduje opóźnienie głównej reakcji hydratacyjnej w porównaniu do próbki referencyjnej o około 12 godzin. Może to być korzystne z punktu widzenia kontroli reologii mieszanki i obniżenia ryzyka wystąpienia naprężeń termicznych. Obniżona intensywność głównego piku dla mieszanki z domieszką ADD1 sugeruje również możliwe ograniczenie szybkości wydzielania się ciepła w początkowej fazie dojrzewania. Potwierdza to postanowia wcześniej tezę, że mieszanka ta może być stosowana w betonach masywnych w celu redukcji naprężeń termicznych.



Rys. 3. Wyniki badania kalorymetrem izotermicznym

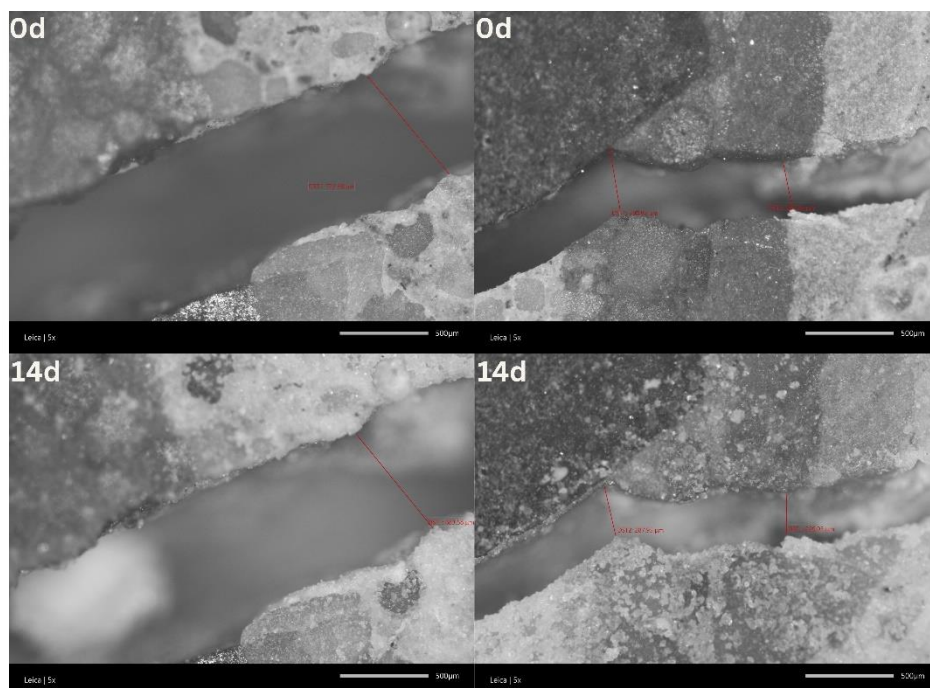
Wyniki badania zdolności do samonaprawy betonu z domieszką ADD1 przedstawione zostały na Rysunku 4. Rozwartość rysy przedstawiona na fotografiach wynosiła do 350 μm . Zauważalna jest wyraźna redukcja szerokości rys lub ich całkowite zamknięcie produktami krystalizacji. Wypełnienia te przyjmują formę krystalicznych osadów i wskazują na postępujący proces autogenicznego leczenia, co spowodowane jest poprzez wytrącanie się produktów takich jak węglan wapnia (CaCO_3) lub wtórne żele C-S-H. Literatura dotycząca domieszek krystalizujących podaje różne skuteczności domieszek w zakresie naprawy rys. Typowo domieszki te mają naprawiać rysy o rozwartości do 0,1 mm [6]. Domieszka ADD1 pozwoliła na zasklepienie rys ponad dwukrotnie większych.



Rys. 4. Wyniki badania zdolności do samonaprawy betonu z domieszką ADD1

Wyniki badania zdolności do samonaprawy betonu referencyjnego przedstawione zostały na Rysunku 5. Po 14 dniach od zarysowania widoczne jedynie są niewielkie krystaliczne struktury na powierzchni całej próbki. Formacje prawdopodobnie są wykwitami związanymi z tlenkami zawartymi w wodzie wodociągowej wykorzystanej do przechowywania próbek. Beton referencyjny nie wykazał zdolności do samonaprawy rysy wymuszonej.

Dla wybranych typów izolacji wykonano zestawienie kosztów wykonania izolacji (Tabela 3) dla przyjętej powierzchni ścian garażu o zmiennej grubości. W analizie pominięto koszt robocizny, uwzględniając tylko cenę rynkową oraz zalecane zużycie materiału podane przez producenta. Wykonana analiza pokazała, że nawet uwzględniając jedynie koszt materiałowy, zastosowanie domieszki krystalizującej ADD1 kosztuje prawie czterokrotnie mniej niż typowa ciężka izolacja KMB, biorąc pod uwagę typową grubość ściany równą 25 cm. Dla maty bentonitowej, różnica ta jest mniejsza, lecz koszt materiału na wykonanie izolacji matą jest i tak ponad 2,5 razy większy.



Rys. 5. Wyniki badania zdolności do samonaprawy betonu referencyjnego REF

Tab. 3. Obliczenie kosztu materiałowego analizowanych izolacji

	ADD1	MB	KMB
Powierzchnia ścian	600 m ²		
Cena jdn.	81 zł/kg	55 zł/m ²	16,25 zł/kg
Zużycie	1 kg/m ³	1 m ² /m ²	4,8 kg/m ²
Koszt na m² ściany			
15 cm	7 290,00 zł	33 000,00 zł	46 800,00 zł
20 cm	9 720,00 zł		
25 cm	12 150,00 zł		
30 cm	14 580,00 zł		
35 cm	17 010,00 zł		
40 cm	19 440,00 zł		

Wyniki uproszczonej analizy LCA dla parametru GWP dla zaproponowanej konstrukcji ścian garażu pokazały znacząco różne wyniki wpływu na ekologię analizowanych typów hydroizolacji (Tabela 4).

Tab. 4. Wpływ zastosowania danego typu izolacji na ekologię

Analiza LCA (A1-A3)			
	ADD1	MB	KMB
Powierzchnia ścian	600 m ²		
Wskaźnik	GWP (kg CO₂-eq.)		
Wartość jdn.	0,949/kg	3,47/m ²	1,11/kg
Wartość całkowita			
15 cm	85,41	2082	3196,8
20 cm	113,88		
25 cm	142,35		
30 cm	170,82		
35 cm	199,29		
40 cm	227,76		

Zastosowanie domieszki ADD1 wygenerowało ponad dziesięciokrotnie mniej CO₂ niż mata bitumiczna i prawie osiemnastokrotnie mniejszy ekwiwalent dwutlenku węgla obliczony dla produkcji materiału (A1-A3). Zastosowanie domieszki krystalicznej jako systemu hydroizolacji wpisuje się w ideę zrównoważonego budownictwa poprzez ograniczenie potrzeby stosowania dodatkowych materiałów izolacyjnych oraz wydłużenie trwałości konstrukcji. Skuteczność systemu hydroizolacji ADD1 została potwierdzona w trakcie realizacji wielu inwestycji na całym świecie [21-23]. Dzięki możliwości samoaktywacji w obecności wilgoci, domieszki krystaliczne pozwalają na wieloletnie zachowanie właściwości hydroizolacyjnych bez potrzeby renowacji, co zmniejsza ślad węglowy związany z eksploatacją obiektu. Rozwiązania tego typu wspierają gospodarkę o obiegu zamkniętym (GOZ), ponieważ ograniczają ilość odpadów budowlanych i umożliwiają bardziej efektywne wykorzystanie zasobów materiałowych. Analiza LCA wskazuje, że zastosowanie domieszki krystalicznej może prowadzić do zmniejszenia całkowitej emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia obiektu, głównie dzięki redukcji materiałów dodatkowych i zwiększeniu trwałości betonu. Domieszki krystaliczne to rozwiązanie proekologiczne, które wspiera nowoczesne podejście do projektowania materiałów o przedłużonym cyklu życia i niskiej ingerencji serwisowej.

Wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Zastosowanie domieszki krystalicznej do betonu może wpłynąć zarówno na parametry reologiczne jak i wytrzymałościowe wytwarzanego betonu. Niezbędne jest więc stosowanie wysokiego reżimu produkcyjnego, uwzględniającego wszystkie wymagania producenta.
2. Domieszka ADD1 firmy Krystaline wpływa znacząco na przebieg procesu hydratacji betonu. Zastosowanie tej domieszki opóźnia wiązanie betonu oraz znacząco ogranicza temperaturę wydzielaną przez mieszaninę w czasie twardnienia, co może mieć pozytywny efekt w przypadku betonów masywnych.
3. Beton modyfikowany domieszką ADD1 wykazał się zdolnością do całkowitego wypełnienia przygotowanych na potrzeby badania rys o szerokości około 0,3 mm. Producent zapewnia również certyfikację naprawy rys większych, o szerokości do 0,5 mm, przy czym w badaniach laboratoryjnych wykonanych

przez producenta, uzyskano również wypełnienie rys do 0,7 mm, a miejscowo 0,9 mm.

4. Analiza kosztów przeprowadzona dla ścian garażu podziemnego i dwóch typowych rozwiązań hydroizolacji dostępnych na polskim rynku pokazała, że wykonanie izolacji poprzez zastosowanie domieszki krystalicznej ADD1 może być ponad dwukrotnie tańsze niż pozostałe rozwiązania. Zastosowanie domieszki nie wymaga również nakładów pracy związanych z układaniem hydroizolacji na elementach konstrukcji.
5. Zastosowanie domieszki krystalicznej ADD1 w uproszczonej analizie LCA dotyczącej wskaźnika CO₂eq dla globalnego ocieplenia, pokazało, że zastosowanie tej domieszki powoduje obniżenie ilości wyprodukowanego CO₂ co najmniej 10-krotnie od porównywanych rozwiązań hydroizolacyjnych.
6. Zastosowanie domieszki krystalicznej ADD1, bazując na wynikach szerokości samonaprawy rys i danych producenta, może znacznie przyczynić się do zmniejszenia ilości zbrojenia niezbędnego do wykonania konstrukcji o podwyższonych parametrach szczelności. Przekłada się to na znacznie niższy koszt wykonania obiektu.

Wykorzystanie nowoczesnych technologii takich jak domieszki krystaliczne, w znacznym stopniu wpływa na poprawę i trwałość, a także na ogólne koszty wykonania konstrukcji. Jest to również rozwiązanie proekologiczne, obniżające ślad węglowy inwestycji.

Literatura

- [1] A. Halicka, D.J. Franczak-Balmas. Żelbetowe zbiorniki na ciecze i materiały sypkie, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2020
- [2] PN-EN 1992-1-1:2008 - Eurokod 2 -- Projektowanie konstrukcji z betonu -- Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [3] H-L Wang, J-G Dai, X-Y Sun, X-L Zhang. Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration, Construction and Building Materials, 107, 2016
- [4] X. Lin, W. Li, A. Caster, T. Kim, Y. Huang, K. Wang. A comprehensive review on self-healing cementitious composites with crystalline admixtures: Design, performance and application, Construction and Building Materials, 409, 2023
- [5] PN-EN 1992-3:2008 - Eurokod 2 -- Projektowanie konstrukcji z betonu -- Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze
- [6] DIN 1045-1:2008 – Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- [7] X. Hu, J. Xiao, Z. Zhang, C. Wang, C. Long, L. Dai. Effects of CCCW on properties of cement-based materials: A review, Journal of Building Engineering, 50, 2022
- [8] R.M. Flores, S. Moscato, P. Serna, L. Ferrara. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments, Construction and Building Materials, 86, 2015
- [9] Z. Jiang, W. Li, Z. Yuan. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials, Cement and Concrete Composites, 57, 2015
- [10] Karta techniczna ADD1 - <https://midfortec.com.pl/>, dostęp 27.05.2025

- [11] D. Jaroenratanapirom, R. Sahamitmongkol. Self-crack closing ability of mortar with different additives, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 21 (1), 2011
- [12] J.L.G Calvo, M.S. Moreno, P. Carballosa, F. Pedrosa. F. Tavares. Improvement of the Concrete Permeability by Using Hydrophilic Blended Additive. *Materials*, 12(15), 2019
- [13] V. Naidenov, M. Mironova. Improvement of the concrete permeability by using hydrophilic blended additive, *Machines, Technologies & Materials*, 3, 2020
- [14] V. Naidenov, M. Mironova, I. Rostovsky. Investigation on the efficiency of internal crystallization chemical admixtures for cement concrete - mechanical characteristics, *Machines, Technologies & Materials*, 14, 2020
- [15] N. Ciak, M.J. Ciak. Wpływ środka hydrofilowego na właściwości betonu, *Materiały Budowlane*, 10, 2018
- [16] H. Hermawan, P. Minne, P. Serna, E. Gruyaert. Understanding the Impacts of Healing Agents on the Properties of Fresh and Hardened Self-Healing Concrete: A Review, *Processes*, 9(12), 2021
- [17] Deklaracja środowiskowa ADD1 - <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/d9132067-6f62-4607-c8b9-08dafef7b801/Data>, dostęp 27.05.2025
- [18] J. Tomaszewska, D. Bekierski, M. Piasecki. Deklaracje środowiskowe wyrobów budowlanych narzędziem wspierającym rozwój zrównoważonego budownictwa, *Przegląd budowlany*, 10, 2017
- [19] W. Kurdowski. *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu & WN PWN, 2010.
- [20] V.S. Ramachandran (ed.) *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology*, 2nd ed., Noyes/Elsevier, 1995.
- [21] <https://krystaline.es/krystalineprojects/high-rise-apartments-india/>, dostęp 27.05.2025
- [22] <https://krystaline.es/krystalineprojects/distrto-digital/>, dostęp 27.05.2025
- [23] <https://krystaline.es/krystalineprojects/morskie-centrum-nauki-krystaline/>, dostęp 27.05.2025