

dr inż. Maciej Gruszczyński^{1)*}

ORCID: 0000-0002-0445-5745

dr inż. Małgorzata Lenart¹⁾

ORCID: 0000-0002-0698-4835

mgr inż. Tadeusz Wasąg²⁾

Analiza przyrostu wytrzymałości wczesnej betonu modyfikowanego domieszkami zawierającymi nanokryształy CSH

Analysis of the increase in early strength of concrete modified with admixtures containing CSH nanocrystals

DOI: 10.15199/33.2022.03.01

Streszczenie. Współcześnie standardem jest dostosowywanie specjalnych właściwości betonu do wymagań realizacyjnych konkretnych inwestycji budowlanych za pomocą różnego typu dodatków czy domieszek. W artykule zaprezentowano wyniki badań betonu modyfikowanego domieszką zawierającą nanokryształy CSH. Przeanalizowano przyrost wytrzymałości betonu o dużej płynności (ASCC) po 8 i 12 h oraz po 1, 2, 7 i 28 dniach jego dojrzewania. Zrealizowany program badawczy wykazał siedmiokrotny przyrost wytrzymałości po 8 h hydratacji. Jednocześnie nie zaobserwowano istotnych zmian wytrzymałości 28-dniowej analizowanego betonu.

Słowa kluczowe: wytrzymałość betonu; beton ASCC; domieszki przyspieszające wiązanie; nanokryształy CSH.

Abstract. Nowadays, the standard is to adapt the special properties of concrete to the implementation requirements of specific construction projects with the use of various types of additives or admixtures. The article presents the results of tests on concrete modified with an admixture containing CSH nanocrystals. The increase in strength of high-fluidity concrete (ASCC) after 8 and 12 hours and after 1, 2, 7 and 28 days of its maturation was analyzed. The conducted research program showed a sevenfold increase in strength after 8 hours of hydration. At the same time, no significant changes in the 28-day strength of the analysed concrete were observed.

Keywords: concrete strength; ASCC concrete; accelerating setting admixtures; CSH nanocrystals.

Współcześnie beton jest najpopularniejszym materiałem konstrukcyjnym. Wynika to z niezaprzeczalnych jego zalet, tj. trwałości, dużej wytrzymałości, łatwości formowania dowolnych kształtów, niskich kosztów wytworzenia oraz dużej dostępności. Oprócz wspomnianych zalet beton ma jednak wady takie, jak kruchość, skurcz i osiągnięcie pełnej wytrzymałości po określonym czasie, co z kolei wiąże się z oczekiwaniem na możliwość wykonania kolejnych operacji technicznych przy wznoszeniu obiektów budowlanych.

Domieszki przyspieszające twardnienie betonu i zalety ich stosowania

Zgodnie z definicją normową, domieszki przyspieszające twardnienie to domieszki zwiększające tempo narastania wytrzymałości wczesnej betonu,

które mogą wpływać lub nie, na szybkość wiązania tego betonu. Historycznie, chlorek wapnia był stosowany jako pierwsza domieszka przyspieszająca wiązanie. Jest ona bardzo skuteczna i efektywna, ale powoduje korozję stali zbrojeniowej oraz wzrost skurczu betonu [8]. Z tego względu stosowanie domieszek chlorkowych w betonach konstrukcyjnych jest obecnie zakazane. Co więcej, norma PN-EN 206 dopuszcza maksymalne stężenie jonów chlorkowych w betonie na poziomie: 1% (klasa CI 1,00) masy cementu (wraz z dodatkami) w betonie niezbrojonym; 0,2% (klasa CI 0,20) lub 0,4% (klasa CI 0,40) w betonie zbrojonym oraz 0,1% (klasa CI 0,10) lub 0,20 (klasa CI 0,20) w betonie sprężanym.

Współcześnie domieszkami przyspieszającymi twardnienie i wiązanie betonu są **domieszki bezchlorkowe**. Do domieszek nieorganicznych z tej grupy należą: azotany i azotyny sodu, potasu i wapnia; węglany sodu i potasu; siarczany i tiosiarczany sodu i potasu; tiosiarczany, gliniany, krzemiany, fluorokrzemiany i wodorotlenki metali alkalicznych. Przyspieszaczami są również niektóre związki or-

ganiczne, takie jak mrówczan wapnia, trietanolamina oraz kwasy karboksylowe czy żywice fenolowe [4, 5, 10]. Efektywność oddziaływania poszczególnych domieszek jest różna i zależy m.in. od składu mineralicznego cementu oraz zastosowanych dodatków [4, 6, 11], których mechanizm działania nie do końca jest jednak wyjaśniony [7] i zależy przede wszystkim od ich charakteru chemicznego [8]. Domieszki przyspieszające twardnienie i wiązanie mogą m.in. przyspieszać reakcje hydratacji cementu, krystalizację portlandytu, zwiększać przepuszczalność warstwy hydratu, powodować zmianę w morfologii powstających produktów. Efektem zastosowania domieszek przyspieszających twardnienie jest możliwość skrócenia czasu pielęgnacji elementów betonowych, wcześniejsze rozpoczęcie kolejnych etapów wznoszenia obiektu budowlanego oraz wykończenia powierzchni elementów. Stosuje się je także w zaprawach i betonach naprawczych oraz podczas betonowania w obniżonej temperaturze. W tym przypadku domieszki kompensują negatywny wpływ obniżonej temperatury

¹⁾ Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ MC-Bauchemie Sp. z o.o.

^{*}) Adres do korespondencji:

maciej.gruszczyński@pk.edu.pl

na tempo narastania wytrzymałości kompozytów cementowych. Warto też zaznaczyć aspekt ekologiczny i ekonomiczny stosowania domieszek przyspieszających twardnienie w prefabrykacji przez zastąpienie obróbki cieplnej betonowych elementów prefabrykowanych oraz umożliwienie szybszej rotacji form [5]. Wymagania dotyczące domieszek przyspieszających twardnienie wg PN-EN 934-2 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wymagania dotyczące domieszek przyspieszających twardnienie wg PN-EN 934-2
Table 1. Requirements for accelerating hardening admixtures acc to PN-EN 934-2

Właściwość	Wymaganie
Wytrzymałość na ściskanie betonu	$f_{c, \text{betonu badanego}} \geq 120\% f_{c, \text{betonu kontrolnego}}$, w temperaturze 20°C po 24 h $f_{c, \text{betonu badanego}} \geq 90\% f_{c, \text{betonu kontrolnego}}$, w temperaturze 20°C po 28 dniach $f_{c, \text{betonu badanego}} \geq 130\% f_{c, \text{betonu kontrolnego}}$, w temperaturze 5°C po 48 h
Zawartość powietrza w mieszanke betonowej	mieszanka badana $\leq 2\%$ objętości powyżej zawartości w mieszanke kontrolnej, chyba że producent wyspecyfikuje inną wartość

Najnowszą generacją są domieszki wprowadzające nanokryształy zwiększające powierzchnię krystalizacji fazy C-S-H [2, 9], a tym samym powodujące szybsze narastanie wytrzymałości wczesnej [1, 3]. Domieszki te zawierają uwodnione krzemiany wapnia w postaci nanokryształów, które rozpraszają się w fazie ciekłej kompozytu cementowego i powodują zwiększenie powierzchni narastania fazy C-S-H nie tylko na ziarnach cementu, ale również na nanozarodnikach w fazie ciekłej. Zjawisko to powoduje przyspieszenie hydratacji cementu we wczesnej fazie (6 ÷ 12 h od zmieszania) [10]. Zastosowanie zarodników fazy C-S-H powoduje powstanie zagęszczonej mikrostruktury kompozytu cementowego, co skutkuje narastaniem wytrzymałości wczesnej.

Program badań

W artykule przeanalizowano możliwość zastosowania domieszki na bazie nanokryształów CSH (*Centrament Rapid Fastkick 111*) jako przyspieszacza twardnienia do produkcji mieszanek betonu towarowego w celu skrócenia czasu operacji technologicznych, związanych z realizacją obiektu. Wymagane było opracowanie receptury betonu klasy C40/50 do wykonania ustroju płyto-słupowego, aby założona klasa betonu zapewniała uzyskanie wytrzymałości po 24 h na poziomie nie niższym niż 30 MPa. Istotnym zagadnieniem było także uzyskanie odpowiedniej konsy-

stencji i urabialności mieszanki ze względu na gęsto rozmieszczone zbrojenie oraz wymagania dotyczące jakości uzyskiwanej powierzchni zewnętrznej elementów. Po przeanalizowaniu wstępnych wymagań technologicznych zdecydowano się na zastosowanie betonu prawie samozagęszczalnego ASCC (ang. *Almost Self Compacting Concrete*), którego czas wibracji był na poziomie 5 – 7 s, czyli zdecydowanie krótszy niż

w przypadku mieszanek tradycyjnych betonów towarowych.

W celu określenia wpływu domieszki zawierającej nanokryształy CSH na właściwości reologiczne mieszanki betonowej oraz na wytrzymałość na ściskanie realizowano program badań, w ramach którego określono właściwości trzech mieszanek o zróżnicowanym poziomie dozowania domieszki wynoszącym odpowiednio 0% (BW – beton wzorcowy), 1% (oznaczenie B1) oraz 2% (oznaczenie B2) w stosunku do masy cementu. Do wykonania mieszanek zastosowano cement portlandzki popiołowy CEM II A/V 42,5R, powszechnie wykorzystywany do produkcji mieszanek betonu towarowego. Wykorzystano kruszywo naturalne o uziarnieniu do 16 mm oraz dodatek krzemionkowego popiołu lotnego. We wszystkich mieszanekach przyjęto stałą wartość wskaźnika $w/c = 0,40$. W celu zapewnienia odpowiednich właściwości reologicznych zastosowano superplastyfikator na bazie eteru polikarboksyłowego PCE. Skład poszczególnych badanych mieszanek betonowych różnił się tylko zawartością superplastyfikatora (dobieranego w celu zapewnienia odpowiedniej konsystencji) i domieszki przyspieszającej wynoszącej, jak już wspomniano, 1 i 2% masy cementu.

Ze względów konstrukcyjno-wykonawczych zaprojektowana mieszanka musiała spełniać wymagania normy PN-EN 206 odnoszące się do klasy eks-

pozycji XC4, XD3 oraz charakteryzować się następującymi właściwościami:

- klasa wytrzymałości C40/50;
- wytrzymałość po 24 h w 20°C większa lub równa 30 N/mm²;
- konsystencja F5/F6 (średnica rozplwy ≥ 560 mm).

Badania mieszanek betonowych obejmowały określenie:

- konsystencji metodą rozplwy stożka wg PN-EN 12350-8 po 10 i 60 min od wymieszania składników;
- zawartości powietrza metodą ciśnieniomierza zgodnie z PN-EN 12350-7;
- gęstości zgodnie z PN-EN 12350-6.

Analiza wyników badań

W tabeli 2 podano wyniki badania konsystencji po 10 i 60 min, a także zawartości powietrza i gęstości mieszanek betonowych. Pozwalają one na zakwalifikowanie wszystkich analizowanych mieszanek do klasy F6 po 10 min oraz do klasy F5 po 60 min od zakończenia procesu mieszania składników. Nie zaobserwowano negatywnego wpływu domieszki zawierającej nanokryształy CSH w ilości 1 i 2% masy cementu na utratę konsystencji mieszanki betonowej. Bardzo dobre utrzymanie konsystencji w czasie 60 min świadczy ponadto o kompatybilności zastosowanego układu cement-superplastyfikator. Uzyskana gęstość zagęszczonych mieszanek betonowych jest praktycznie tożsama z wyliczoną na podstawie receptur. Różnica mieści się w przedziale 1,2 ÷ 1,6%. Świadczy to o braku niekontrolowanego napowietrzenia mieszanki, co dodatkowo potwierdziły badania zawartości powietrza.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie ana-

Tabela 2. Właściwości badanych mieszanek betonowych (BW – beton wzorcowy, B1 – beton z 1% i B2 – beton z 2% zawartością domieszki przyspieszającej wiązanie)
Table 2. Properties of tested concrete mixtures (BW – reference concrete, B1 – concrete with 1% and B2 – concrete with 2% content of accelerating setting admixture)

Table 2. Properties of tested concrete mixtures (BW – reference concrete, B1 – concrete with 1% and B2 – concrete with 2% content of accelerating setting admixture)

Mieszanka	Zawartość powietrza [%]	Rozplwy [mm] po		Gęstość mieszanki [kg/m ³]
		10 min	60 min	
BW	1,6	640	590	2420
B1	1,4	650	600	2400
B2	1,3	650	590	2395

Tabela 3. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie

Table 3. Compressive strength test results

Wiek betonu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
	BW	B1	B2
8 h	1,4	6,8	10,6
12 h	11,1	17,6	21,7
24 h	18,1	31,5	34,2
2 dni	27,8	34,8	38,5
7 dni	47,2	48,8	50,4
28 dni	58,4	57,6	60,3

lizowanych betonów, a na rysunku 1 przebieg rozwoju wytrzymałości na ściskanie w czasie dojrzewania.

Zastosowanie nanodomieszki CSH w ilości 1 ÷ 2% w stosunku do masy cementu w sposób wyraźny powoduje wzrost wytrzymałości wczesnej betonu na ściskanie, szczególnie w okresie 8 ÷ 48 h. Różnice wytrzymałości zanikają po ok. 7 dniach dojrzewania betonów. W celu lepszego zobrazowania wpływu omawianej domieszki na rozwój wytrzymałości betonu na ściskanie, na rysunku 2 przedstawiono procentowy udział wytrzymałości betonów modyfikowanych przedmiotową domieszką w porównaniu z betonem wzorcowym.

Zastosowanie domieszki przyspieszającej wiązanie z nanokryształami CSH w ilości 1 ÷ 2% w stosunku do masy cementu przynosi największe efekty w pierwszych godzinach dojrzewania betonu. Obserwowane wartości wytrzymałości betonów modyfikowanych po 8 h były 5 – 7 razy większe w porównaniu z betonem wzorcowym, a po 24 h 1,8 – 2 razy większe. Co niezwykle istotne, domieszka ta nie powoduje spadku wytrzyma-

łości końcowej, charakterystycznego w przypadku innych domieszek przyspieszających twardnienie. Z badań wynika, że wszystkie serie betonu uzyskały bardzo zbliżoną wartość wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach wynoszącą 58 ÷ 60 MPa, co z zapasem gwarantuje uzyskanie założonej klasy wytrzymałości C40/50.

Podsumowując, zastosowanie domieszki z nanokryształami CSH przyspieszającej twardnienie betonu umożliwiło osiągnięcie wytrzymałości na ściskanie po 24 h na poziomie niższym niż 30 MPa. Na uwagę zasługuje również fakt, że beton wzorcowy miał taką wytrzymałość po trzech dobach dojrzewania, a końcowa wytrzymałość (po 28 dniach) pozostawała praktycznie na stałym poziomie w przypadku wszystkich analizowanych serii betonu.

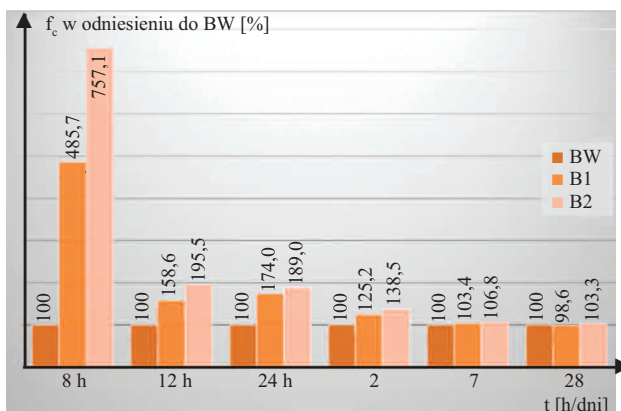
Wnioski

Na podstawie literatury oraz zrealizowanego programu badawczego stwierdzono:

- skuteczność domieszki przyspieszającej twardnienie, zawierającej nanokryształy CSH, w przypadku betonu o dużej płynności;
- badana domieszka okazała się w pełni kompatybilna z typową domieszką upłynniającą stosowaną do uzyskiwania mieszanek o dużej ciekłości;

- badana konfiguracja dwóch domieszek pozwoliła na utrzymanie założonej konsystencji przez co najmniej 60 min; jednocześnie nie obserwowano wzrostu napowietrzenia badanych mieszanek betonowych;

- największy wpływ domieszki zawierającej nanokryształy CSH na przyrost wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano w pierwszych 24 h; był on proporcjonalny do poziomu dozowania domieszki w zakresie 1 ÷ 2% masy cementu;



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie betonów modyfikowanych domieszką z nanokryształami CSH w odniesieniu do wytrzymałości betonu wzorcowego

Fig. 2. Compressive strength of concretes modified with an admixture with CSH nanocrystals in relation to the strength of the reference concrete

- w badaniach nie zaobserwowano negatywnego wpływu zastosowanej konfiguracji układu domieszek na wytrzymałość 28-dniową badanych betonów.

Literatura

[1] Cao Y., P. Zaverterri, J. Youngblood, R. Moon, J. Weiss. 2015. „The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste”. *Cem. Concr. Compos.* 56: 73 – 83.

[2] Das S., S. Ray, S. Sarkar. 2020. „Early strength development in concrete using preformed CSH nanocrystals”. *Constr. Build. Mater.* 233: 117214.

[3] Dousti M. R., Y. Boluk, V. Bindiganavile. 2019. „The effect of cellulose nanocrystal (CNC) particles on the porosity and strength development in oil well cement paste”. *Constr. Build. Mater.* 205: 456 – 462.

[4] Felekoğlu B., K. Tosun, B. Baradan. 2011. „Compatibility of a polycarboxylate-based superplasticiser with different set-controlling admixtures”. *Constr. Build. Mater.* 25: 1466 – 1473.

[5] Gołda A., S. Kaszuba. 2008. *Wpływ zabiegów technologicznych na tempo narastania wytrzymałości na ściskanie betonu*, in: X Symp. Nauk.-Tech. „Reologia w Technologii Betonu,” Gliwice, pp. 25 – 32.

[6] Hartmann A., M. Khakhutov, J. C. Buhl. 2014. „Hydrothermal synthesis of CSH-phases (tobermorite) under influence of Ca-formate”. *Mater. Res. Bull.* 51: 389 – 396.

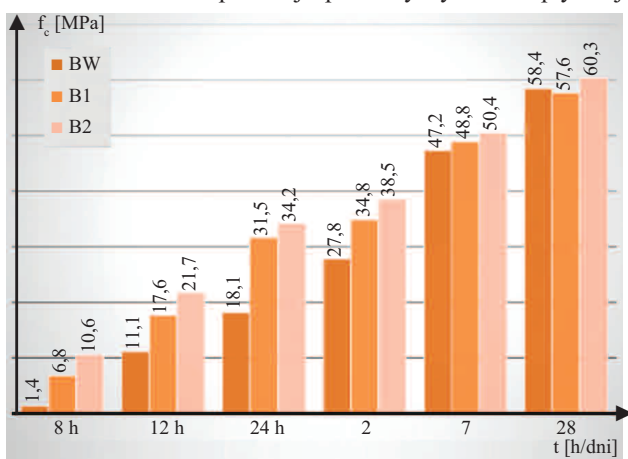
[7] Łukowski P. 2014. „Domieszki przyspieszające wiązanie i twardnienie betonu”. *BTA* 3.

[8] Neville A. M. 2000. *Właściwości betonu*. Wydanie IV, Polski Cement. Kraków.

[9] Szczotkowska M., P. Brzozowski. 2014. „Wpływ nanokryształów CSH na wytrzymałość betonów cementowych stosowanych w budownictwie komunikacyjnym”. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 5: 35 – 40.

[10] Szostak B., G. Ludwik. 2020. „Wpływ domieszki zawierającej nanometryczne zarodki fazy C-S-H na właściwości betonów popiołowych poddanych obciążeniom w pierwszych 7 dniach dojrzewania”. *Przegląd Budowlany* 6: 44 – 47.

Przyjęto do druku: 31.01.2022 r.



Rys. 1. Rozwój wytrzymałości na ściskanie badanych betonów z zaznaczonymi różnicami poziomów wytrzymałości

Fig. 1. Development of the compressive strength of the tested concretes with marked differences in strength levels