

WPLYW NANOKRYSTAŁÓW CSH NA WYTRZYMAŁOŚĆ BETONÓW CEMENTOWYCH STOSOWANYCH W BUDOWNICTWIE KOMUNIKACYJNYM

Monika SZCZOTKOWSKA, Piotr BRZOZOWSKI*

Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin

Streszczenie: W pracy zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych wpływu domieszki chemicznej, zawierającej w składzie nanokrystały CSH, na rozwój wczesnej wytrzymałości betonu. Osiągnięcie wysokich wczesnych wytrzymałości betonu jest niezbędne do szybkiego rozszalowania elementów prefabrykowanych wykorzystywanych w budownictwie drogowym i mostowym. Przyspieszenie procesu wiązania pozwala na skrócenie procesu produkcyjnego oraz zwiększenie wydajności zakładu. Do badań użyto trzech mieszanek betonowych: wzorcowej, z domieszką chemiczną zawierającą nanokrystały CSH oraz z dodatkiem mikrokrzemionki. Określono wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie przy rozłupywaniu badanych betonów co 2 godziny od czasu zafarmowania próbek przez okres 12 godzin oraz po 1, 3, 7 i 28 dniach. Potwierdzono pozytywny wpływ zastosowanej nanodomieszki na wczesne wytrzymałości betonu.

Słowa kluczowe: elementy prefabrykowane, nanokrystały CSH, wczesna wytrzymałości betonu.

1. Wprowadzenie

We współczesnym świecie beton jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów budowlanych i znajduje zastosowanie we wszystkich dziedzinach budownictwa. Duże zapotrzebowanie na ten materiał oraz szybki rozwój technologii, który dokonał się w ciągu ostatnich lat sprawia, że stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczące jakości i trwałości oraz technologii betonowania elementów i konstrukcji. W celu skrócenia procesów budowlanych częściej stosuje się technikę prefabrykacji pozwalającą na złożenie konstrukcji z wcześniej wykonanych elementów oraz masową produkcję elementów małogabarytowych. Jako przykłady powszechnie stosowanych wielkogabarytowych prefabrykowanych elementów infrastruktury drogowej można wymienić belki mostowe, elementy przepustów, panele, ekrany akustyczne oraz pale żelbetowe (Chęcińska, 2012).

Osiągnięcie wysokich wczesnych wytrzymałości betonu jest niezbędne do szybkiego rozszalowania elementów prefabrykowanych, co pozwala na skrócenie procesu produkcyjnego oraz zwiększenie produktywności zakładu. Najwyższe wymagania stawiane są betonom używanym do produkcji prefabrykowanych belek sprężonych. Standardowe klasy wytrzymałości takich betonów to C40/50, a nawet C50/60. Dodatkowo, aby móc wprowadzić do elementu siłę sprężającą a następnie zabudować go w konstrukcji, wymagane jest osiągnięcie wytrzymałości betonu na poziomie 70-80% jego

wytrzymałości 28-dniowej (Chęcińska, 2012; Kłosa i Pauch, 2005).

Według Paprockiego i Szewczyka (1976), skrócenie czasu twardnienia betonu możliwe jest w wyniku:

- zastosowania cementów szybko twardniejących,
- stosowania dodatków lub domieszek chemicznych przyspieszających dojrzewanie betonu,
- termicznej obróbki elementów,
- mechanicznego przyspieszenia dojrzewania.

Jako spoiwo najczęściej używane są cementy portlandzkie klasy 42,5 i 52,5 o wysokiej wartości wytrzymałości wczesnej. Jeżeli chodzi o obróbkę termiczną, w zakładach prefabrykacji stosowane są obecnie głównie dwie metody (Golda i Kaszuba, 2008): autoklawizacja oraz niskoprężne naporowanie. Obie metody wymagają zazwyczaj komór bądź tuneli dostosowanych do linii produkcyjnej zakładu. Konieczne jest także dostarczenie energii potrzebnej do osiągnięcia i utrzymywania zakładanej temperatury obróbki.

Alternatywą do obróbki termicznej jest zastosowanie domieszek przyspieszających dojrzewanie betonu, pozwalających na jej ograniczenie lub nawet całkowite wyeliminowanie. W większości przypadków, samo zastosowanie odpowiednio dobranych plastyfikatorów lub superplastyfikatorów, poprzez obniżenie ilości wody zarobowej, prowadzi do przyspieszenia procesu twardnienia. Wraz z rozwojem technologii betonu opracowano szereg nowoczesnych domieszek

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: piotr.brzozowski@zut.edu.pl

chemicznych zwiększających wczesne wytrzymałości betonu, na przykład badane przez Goldę i Kaszubę (2008) domieszki na bazie eterów polikarboksyliowych lub zawierające azotan wapnia.

Nowe możliwości otwiera także nanotechnologia, czyli kształtowanie struktury stwardniałego betonu na poziomie pojedynczych atomów i cząstek. Możliwe jest wprowadzenie do mieszanki betonowej zarodników, którymi mogą być uwodnione i zmielone cząsteczki cementu bądź wapna hydratyzowanego (Bołtryk i Lelusz, 2004). Od niedawna produkowane są także cementy specjalne – zawiesiny zawierające sztuczne zarodki kryształów fazy CSH, przyspieszające proces hydratacji cementu w jego początkowym okresie (Pużak i in., 2010).

Istotnym zagadnieniem jest także konsystencja oraz urabialność betonów używanych do wytwarzania elementów prefabrykowanych. Ze względu na gęsto rozmieszczone zbrojenie pojawiają się problemy z zagęszczeniem mieszanki, wymagana jest także duża jej płynność. Odpowiednie właściwości mają betony samozagęszczalne – SCC (*Self Compacting Concrete*) oraz prawie samozagęszczalne – ASCC (*Almost Self Compacting Concrete*), które w przeciwieństwie do betonu SCC, do odpowietrzenia i zagęszczenia wymagają wzbudzenia i wibracji tradycyjnymi technikami (wibrator wgłębny, przyczepny czy wibracja całym stołem formierskim). Jednakże czas wibracji jest zdecydowanie krótszy niż w przypadku betonów tradycyjnych, często na poziomie 5-7 sekund (Świerczyński, 2002). Betony te uzyskują zakładane parametry wytrzymałościowe, a także wykazują odpowiednią trwałość i odporność na działanie środowiska.

Celem badań przedstawionych w artykule było określenie wpływu dodatku domieszki chemicznej zawierającej nanokryształy CSH na kształtowanie się wczesnych wytrzymałości betonów na ściskanie i rozciąganie oraz ich rozwój w czasie. Określono również wpływ domieszki na gęstość i nasiąkliwość badanych betonów oraz wartości modułów sprężystości.

2. Program i zakres badań

W celu określenia wpływu domieszki chemicznej zawierającej nanokryształy CSH na właściwości reologiczne mieszanki betonowej oraz właściwości stwardniałego betonu przeprowadzono badania porównawcze z użyciem trzech mieszanek, których składy podano w tabeli 1. Symbolem M2 oznaczono mieszankę zawierającą domieszkę przyspieszającą proces hydratacji, natomiast jako M1 oznaczono mieszankę referencyjną, nie zawierającą domieszki. Dodatkowo, wykonano badania mieszanki betonowej z 5% zawartością mikrokrzemionki – M3.

Tab. 1. Składy mieszanek betonowych

Składnik [kg/m ³]	Mieszanka		
	M1	M2	M3
CEM I 42,5R	360	360	327
Woda	162	162	162
Piasek 0/2 mm	595	595	595
Żwir 2/16 mm	1264	1264	1264
Superplastyfikator	8,1	8,1	8,1
Nanodomieszka	0	8,2	0
Mikrokrzemionka	0	0	16,35

Do wykonania mieszanek zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R, powszechnie stosowany w przypadku produkcji elementów prefabrykowanych. Zastosowano kruszywo naturalne o uziarnieniu do 16 mm. We wszystkich mieszankach zachowano stałą wartość wskaźnika $w/c = 0,45$. Założono docelową klasę wytrzymałości betonu C40/50 oraz nasiąkliwość wagową poniżej 5%. Zastosowano superplastyfikator na bazie sulfonianów naftalenowych w ilości 2% masy cementu.

W mieszance M2 jako domieszkę przyspieszającą proces hydratacji cementu zastosowano nanodomieszkę będącą zawiesiną zawierającą zarodniki krystalizacji – fazę CSH w postaci nanocząstek. Dozowano ją w ilości 2% masy cementu.

Zhydratyzowane krzemiany wapnia, nazywane w skrócie CSH, mają budowę bezpostaciową. Jest to żel, zbudowany z silnie przyciągających się nanocząstek, którego zadaniem jest wypełnienie wszystkich miejsc między ziarnami cementu. Jest on najważniejszym składnikiem końcowego produktu, czyli kamienia cementowego i w silny sposób decyduje o właściwościach zaczynu i dojrzałego betonu. W normalnym przypadku powstawanie fazy CSH zachodzi w pobliżu ziaren cementu lub na ich powierzchni tworząc warstwę, która spowalnia późniejsze przemieszczanie się reagentów i produktów reakcji, przez co cały proces hydratacji jest utrudniony i zachodzi w znacznie dłuższym czasie. Wprowadzenie do mieszanki betonowej domieszki zawierającej nanokryształy powoduje, że wytwarzanie się żelu CSH następuje w pewnej odległości od powierzchni ziaren cementu. Dzięki temu w mniejszych ilościach wydziela się wodorotlenek wapnia, a co za tym idzie dalsza hydratacja nie jest utrudniona i może przebiegać w sprzyjających warunkach. Powoduje to powstawanie zwiększonych ilości żelu CSH, który znacząco wpływa na wytrzymałości betonu.

Badania mieszanek obejmowały określenie konsystencji metodą rozplywu stożka, zgodnie z PN-EN 12350-8, bez zagęszczania mieszanki, tak jak ma to miejsce w przypadku betonów SCC. Badania wytrzymałościowe oraz oznaczenie innych cech fizycznych badanych betonów wykonano na próbkach sześciennych o boku 150 mm.

Program badań obejmował:

- rozwój wytrzymałości na ściskanie po: 4, 6, 8, 10, 12 i 24 godzinach oraz 3, 7 i 28 dniach dojrzewania;
- rozwój wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu po: 6, 8, 10, 12 i 24 godzinach oraz 3, 7 i 28 dniach dojrzewania;
- gęstość w stanie suchym po 28 dniach dojrzewania;
- nasiąkliwość wagowa po 28 dniach dojrzewania.

Dodatkowo, wykonano próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm w celu oznaczenia 28 dniowego modułu sprężystości betonu. Próbki sześciennie formowano w dwóch warstwach, zagęszczając każdą z nich na stole wibracyjnym przez 2 sekundy. Zagęszczanie przez tak krótki czas pozwoliło na odpowietrzenie mieszanek oraz nie spowodowało segregacji ich składników. Po zaformowaniu, próbki przechowywane były w komorze, w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 95%. Rozformowywanie następowało tuż przed badaniem, odpowiednio po 4, 6, 8, 10, 12 i 24 godzinach. Pozostałe próbki rozformowano po 24 godzinach i przechowywano do czasu badania w komorze w stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych.

3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań konsystencji mieszanek przedstawiono w tabeli 2. Wszystkie mieszanki można zakwalifikować jako prawie samozagęszczalne – ASCC. Zaobserwowano wyraźny spadek konsystencji w przypadku mieszanki z dodatkiem nanodomieszki. W przypadku dodania mikrokrzemionki spadek konsystencji w stosunku do mieszanki referencyjnej był nieznaczny.

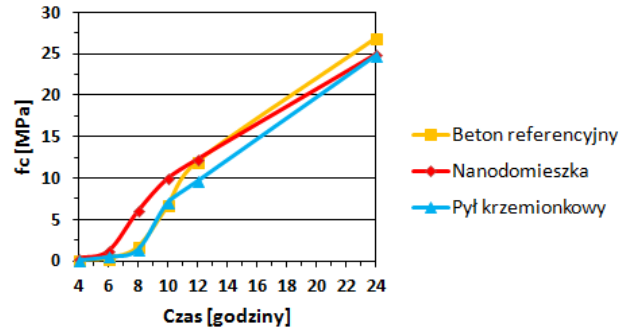
Tab. 2. Właściwości reologiczne mieszanek betonowych

Mieszanka	M1	M2	M3
Średnica rozptywu [cm]	51	36	50
Opad stożka [cm]	26	21	25

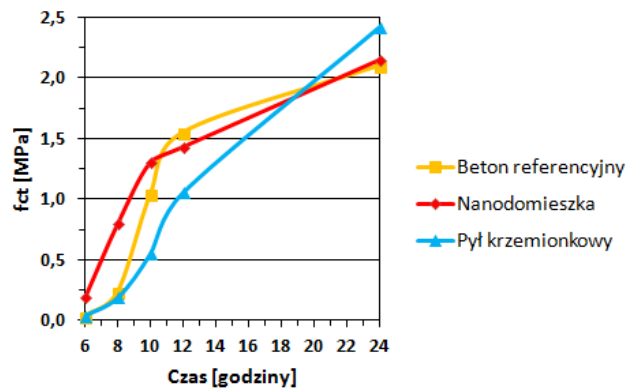
Tab. 3. Wyniki badań wytrzymałościowych

Wiek betonu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
4 godziny	0,13	0,35	0,09	-	-	-
6 godzin	0,33	1,22	0,50	0,04	0,19	0,04
8 godzin	1,71	6,06	1,38	0,24	0,80	0,19
10 godzin	6,69	10,02	7,07	1,04	1,30	0,55
12 godzin	12,03	12,33	9,63	1,55	1,43	1,05
24 godziny	26,91	24,99	24,75	2,10	2,15	2,42
3 dni	36,96	37,56	36,75	2,82	2,88	3,20
7 dni	49,62	45,54	46,23	3,45	3,36	3,55
28 dni	55,14	50,64	61,11	4,49	4,18	4,37

Wartości wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie przy rozłupywaniu zestawiono w tabeli 3. Analizując rozwój wytrzymałości na ściskanie (rys. 1) oraz rozciąganie przy rozłupywaniu (rys. 2) we wczesnym okresie dojrzewania betonów stwierdzono wyraźny wzrost obu wytrzymałości w przypadku dodania do betonu nanodomieszki. Różnice zanikają po około 12 godzinach, kiedy wartości wytrzymałości dla betonu referencyjnego oraz betonu z domieszką są do siebie zbliżone.



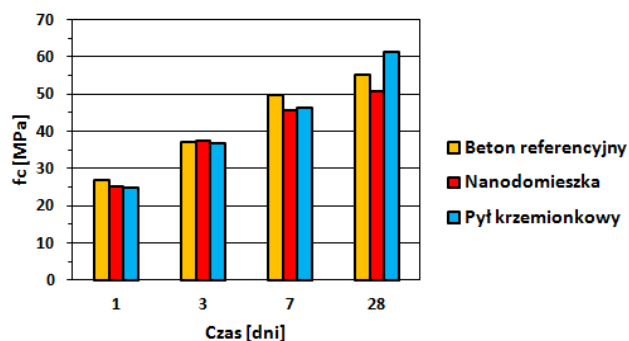
Rys. 1. Rozwój wytrzymałości na ściskanie we wczesnym okresie dojrzewania



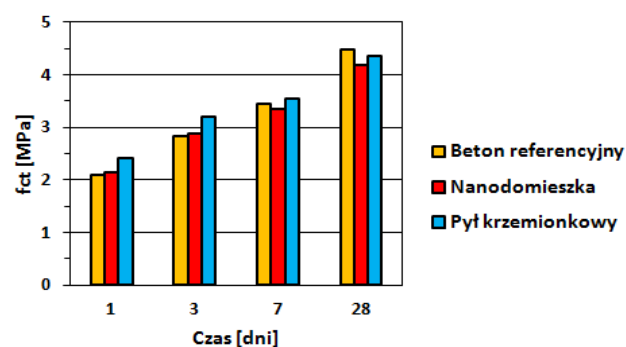
Rys. 2. Rozwój wytrzymałości na rozciąganie we wczesnym okresie dojrzewania

W przypadku betonu z mikrokrzemionką, w ciągu pierwszego dnia dojrzewania zaobserwowano najniższe wartości wytrzymałości zarówno na ściskanie, jak i rozciąganie. Wyjątkiem była tu 24-godzinna wytrzymałość na rozciąganie, która była najwyższa spośród wszystkich trzech betonów.

W późniejszym etapie dojrzewania, po 3, 7 i 28 dniach od zaformowania, nie stwierdzono pozytywnego wpływu nanodomieszki na wytrzymałości badanych betonów (rys. 3 i 4) Dla zawierającego ją betonu uzyskano najniższe wartości, zarówno jeżeli chodzi o ściskanie, jak i rozciąganie. Uzyskane wyniki pozwoliły na przypisanie go do klasy C35/45 co oznacza niespełnienie pierwotnych założeń uzyskania klasy wytrzymałości C40/50, którą uzyskano dla betonu referencyjnego. Największe wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania uzyskano dla betonu z dodatkiem mikrokrzemionki, co pozwoliło zaklasyfikować go do klasy C45/55, wyższej niż pierwotnie zakładana.

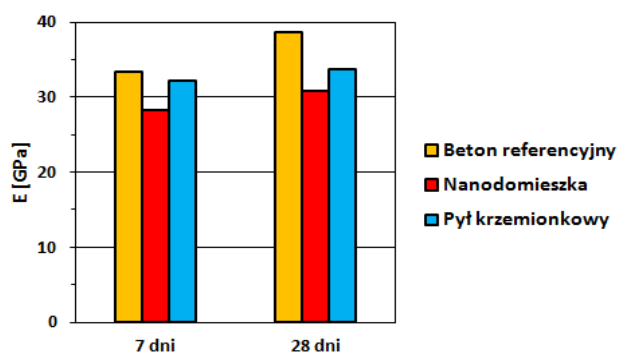


Rys. 3. Wytrzymałości na ściskanie w późniejszym okresie dojrzewania



Rys. 4. Wytrzymałości na rozciąganie w późniejszym okresie dojrzewania

Również w przypadku oznaczenia modułu sprężystości betonu po 7 i 28 dniach najniższe wartości uzyskano dla betonu z dodatkiem nanocząstek (rys. 5). Także dodanie do mieszanki mikrokrzemionki wpłynęło negatywnie na moduł sprężystości betonu.



Rys. 5. Moduły sprężystości betonów po 7 i 28 dniach dojrzewania

Wyniki pomiarów nasiąkliwości wagowej oraz gęstości betonów po 28 dniach dojrzewania zestawiono w tabeli 4. W przypadku wszystkich trzech badanych betonów udało się spełnić założenie dotyczące ich maksymalnej nasiąkliwości, uzyskane wartości nie przekroczyły 5%. Zaobserwowano wzrost nasiąkliwości w przypadku dodania do betonu nanodomieszki oraz jej zmniejszenie dla betonu z mikrokrzemionką. Odnotowano również różnicę w gęstości pomiędzy betonami M1 i M3, dla których kształtowała się ona na poziomie 2350 kg/m³, a betonem z nanodomieszką – M2, którego gęstość osiągnęła wartość około 2300 kg/m³ pomimo tego, że do sporządzenia tej mieszanki użyto największej ilości materiałów (tab. 1).

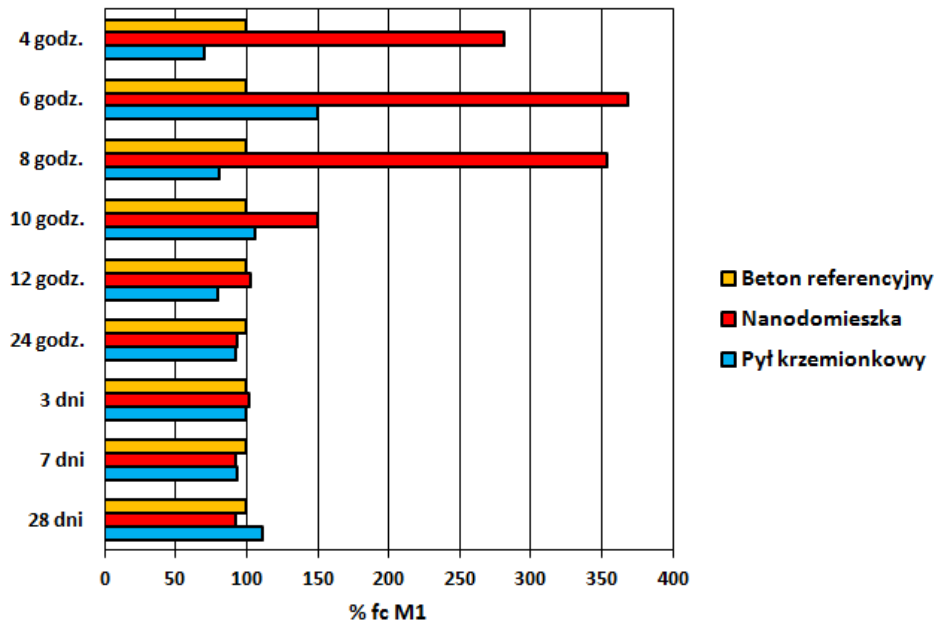
Tab. 4. Nasiąkliwość oraz gęstość badanych betonów

Mieszanka	M1	M2	M3
Nasiąkliwość [%]	3,3	3,6	3,1
Gęstość w stanie suchym [kg/m ³]	2352	2301	2356

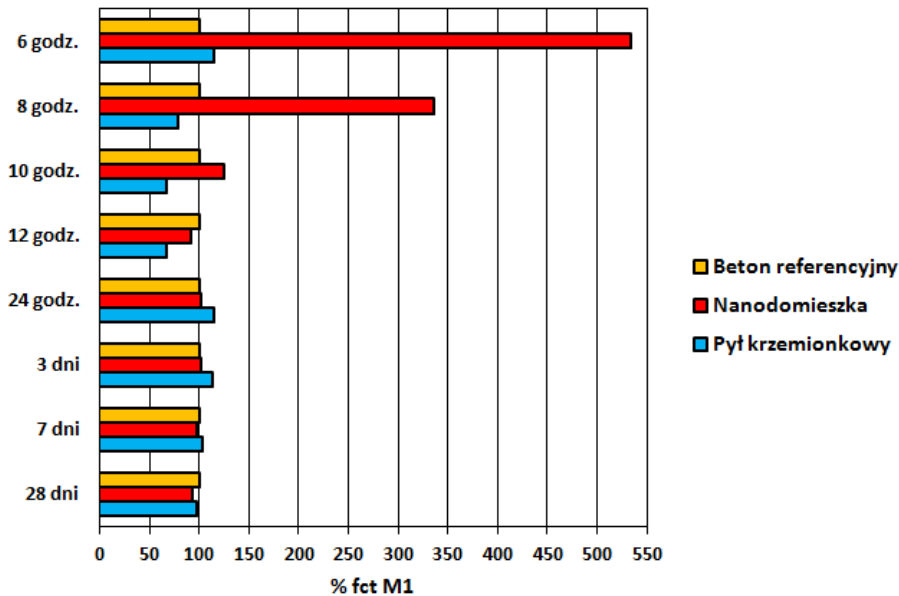
4. Podsumowanie

Wszystkie wykonane mieszanki charakteryzowały się konsystencją pozwalającą na zaklasyfikowanie ich jako betony prawie samozagęszczalne – ASCC, więc mogły być ułożone z ograniczonym do minimum zagęszczaniem.

Zastosowanie nanotechnologii w produkcji betonu w zakładach prefabrykacji może stanowić alternatywę dla typowych domieszek przyspieszających twardnienie betonu lub obróbki cieplnej elementów prefabrykowanych. Zaobserwowano pozytywny wpływ domieszki zawierającej nanocząsteczki fazy CSH na wczesne wytrzymałości betonu zarówno na ściskanie, jak i rozciąganie. Wpływ ten najwyraźniej widać w trakcie pierwszych 10 godzin dojrzewania betonu (rys. 6 i 7). W późniejszym okresie nastąpił jednak spadek wytrzymałości oraz modułu sprężystości w stosunku do betonu referencyjnego, przez co nie udało się uzyskać betonu o zakładanej klasie wytrzymałości. Zwiększeniu uległa także nasiąkliwość betonu, jednak w tym przypadku nie przekroczono wartości dopuszczalnej. Analizując właściwości reologiczne zaobserwowano wyraźny spadek konsystencji mieszanki M2



Rys. 6. Procentowy udział wytrzymałości na ściskanie betonów M2 oraz M3 w porównaniu do betonu referencyjnego M1



Rys. 7. Procentowy udział wytrzymałości na rozciąganie betonów M2 oraz M3 w porównaniu do betonu referencyjnego M1

w porównaniu do dwóch pozostałych, co należy mieć na uwadze przy projektowaniu składu mieszanki.

Dodatek mikrokrzemionki spowodował nieznaczne zmniejszenie tempa narastania wytrzymałości, pozwolił jednak na osiągnięcie wyższych wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania oraz spowodował obniżenie nasiąkliwości betonu. Nie zauważono także dużego spadku konsystencji w porównaniu do mieszanki referencyjnej.

Literatura

- Bołtryk M., Lelusz M. (2004). Technologia konstrukcji prefabrykowanych. *Politechnika Białostocka*, Białystok 2004.
- Chęcińska K. (2012). Prefabrykaty żelbetowe w budownictwie drogowo-mostowym 2010-2012 – przykłady i zastosowanie. W: Materiały „Dni betonu 2012”, Wisła, 695-704.
- Golda A., Kaszuba S. (2008). Wpływ zabiegów technologicznych na tempo narastania wytrzymałości na ściskanie betonu. *Reologia w technologii betonu*, Gliwice, 25-32.
- Kłosa M., Pauch C. (2005). Stosowanie betonu samozagęszczalnego w produkcji elementów prefabrykowanych. *Reologia w technologii betonu*, Gliwice, 113-120.

- Paprocki A., Szewczyk S. (1976). Prefabrykacja budowlana cz. I. *WSiP*, Warszawa.
- Pużak T., Skalec H., Grzesiak K. (2010). Nanotechnologia w prefabrykacji betonowej. *Reologia w technologii betonu*, Gliwice, 45-56.
- Świerczyński W. (2002). Produkcja prefabrykatów betonowych w technologii ASCC i SCC. *Reologia w technologii betonu*, Gliwice, 31-42.

INFLUENCE OF CSH NANOCRYSTALS ON STRENGTH OF THE CONCRETE USED IN PRECAST ELEMENTS IN ROAD AND BRIDGE CONSTRUCTION

Abstract: The paper presents the results of laboratory tests of the influence of the chemical admixture containing the CSH nanocrystals on the early strength of concrete. Achieving high

early strength of the concrete is necessary for the fast formwork removal from prefabricated elements used in road and bridge construction. Faster binding allows to shorten the manufacturing process and is increasing the productivity of the plant. For the tests three mixtures were used: reference one, mixture with the chemical admixture and mixture with the addition of silica fume. The compressive and the tensile splitting strength of the concrete were determined for the time of 12 hours from the time of preparation of the samples and after 1, 3, 7 and 28 days. The results allowed to confirm the positive effect of the chemical admixture containing the CSH nanocrystals on the early strength of the concrete.