

dr hab. inż. Jacek Gołaszewski, prof. nzw. PŚI\*

# Współpraca domieszek z cementami

Domieszki do betonu to substancje chemiczne dodawane w ilości nie większej niż 5% masy cementu. Umożliwiają kształtowanie właściwości mieszanki betonowej i/lub betonu, a w konsekwencji uzyskanie korzystnych efektów, z których za najważniejsze uważa się: redukcję ilości wody w mieszance; poprawę właściwości reologicznych (urabialności) mieszanki; sterowanie czasem wiązania cementu i prędkością przyrostu wytrzymałości betonu; ograniczenie zmian objętościowych betonu oraz zwiększenie jego wytrzymałości i trwałości [1, 2]. Na rynku dostępnych jest wiele różnych domieszek, różniących się istotnie efektami działania, składem i właściwościami (tabela). Zwykle modyfikują one kilka cech mieszanki lub stwardniałego betonu, przy czym możliwe jest, że poprawiając jedną, pogarszają inne (tabela). Skuteczność działania domieszek zależy od wielu czynników technologicznych, a optymalny ich dobór stanowi jeden z najważniejszych problemów w technologii betonu.

## Efektywność działania domieszek

Skuteczność działania domieszek chemicznych można zdefiniować jako kryterium i charakterystykę jakości ich działania ze względu na funkcję i związany z nią podstawowy efekt działania [3]. Efekt podstawowy jest rozumiany jako efekt działania domieszki odpowiadający jej funkcji i będący bezpośrednią konsekwencją fizycznego mechanizmu jej działania. Zwykle przy ocenie efektywności działania domieszki i jej stosowaniu należy uwzględnić efekty drugorzędne, ze względu na możliwy niekorzystny wpływ domieszki na ważne cechy mieszanki betonowej i/lub stwardniałego betonu.

Efektywność działania domieszek chemicznych należy rozpatrywać w aspektach technicznym, technologicznym i ekonomicznym [3]. **Efektywność techniczną** można wyznaczyć jako iloraz wymaganego efektu podstawowego, czyli zmia-

ny właściwości mieszanki betonowej i/lub stwardniałego betonu oraz minimalnej ilości domieszki koniecznej do jego wywołania. **Efektywność ekonomiczną** wyznacza się jako koszt jednostki efektu podstawowego modyfikacji domieszką.

**Efektywność technologiczna** to łatwość i bezpieczeństwo stosowania domieszki oraz wrażliwość efektów jej stosowania na zmiany warunków technologicznych. W praktyce o wyborze domieszki decydują głównie aspekty ekonomiczne i techno-

## Najczęściej stosowane domieszki, ich skład oraz efekty podstawowe i drugorzędne

Domieszka	Substancja (rodzaj)	Efekt podstawowy	Efekty drugorzędne
Plastyfikatory	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ kwasy lignosulfonowe i ich sole (Ca, Na, Mg, NH<sub>4</sub>)</li> <li>■ kwasy hydroksykarboksylowe i ich sole (zawierające grupy (OH), (COOH))</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ uplastycznienie mieszanki – zmiana właściwości reologicznych mieszanki</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ czas początku wiązania cementu</li> <li>■ zawartość powietrza w mieszance</li> </ul>
Superplastyfikatory	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ sole sulfonowanych naftaleno-wo-formaldehadowych polimerów (SNF)</li> <li>■ sole sulfonowanych melamino-wo-formaldehadowych polimerów (SMF)</li> <li>■ polimery karboksylowe (polimery i kopolimery karboksylowych kwasów akrylowych (PC) oraz polimery usieciowane (CLPC))</li> <li>■ etery karboksylowe (PE)</li> <li>■ inne substancje o bliżej nieokreślonych właściwościach i charakterystykach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ upłynnienie mieszanki – znacząca zmiana właściwości reologicznych mieszanki</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ czas początku wiązania cementu</li> <li>■ zawartość powietrza w mieszance</li> </ul>
Domieszki zwiększające lepkość	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ syntetyczne i naturalne polimery organiczne – etery celulozy, politenek etylenu, polikryloamidy, polialkohol winylowy</li> <li>■ organiczne rozpuszczalne w wodzie flokulanty – kopolimery styrenowe z grupami karboksylowymi, syntetyczne polielektrolyty, naturalne gumy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ zwiększenie lepkości – zmiana właściwości reologicznych mieszanki</li> <li>■ zmniejszenie segregacji i bleedingu mieszanki</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ właściwości reologiczne mieszanki</li> <li>■ czas początku wiązania cementu</li> <li>■ zawartość powietrza w mieszance</li> </ul>
Domieszki opóźniające wiązanie i twardnienie	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ kwasy fosforowe i ich sole</li> <li>■ heptaoksotetraborany</li> <li>■ fluorki</li> <li>■ tlenki metali Pb, Zn</li> <li>■ lignosulfoniany</li> <li>■ cukry proste i złożone – glukoza, sacharoza</li> <li>■ kwasy i sole kwasów hydroksykarboksylowych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ czas wiązania</li> <li>■ ciepło hydratacji</li> <li>■ wczesna i długoterminowa wytrzymałość na ściskanie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ właściwości reologiczne mieszanki</li> <li>■ zawartość powietrza</li> </ul>
Domieszki przyspieszające wiązanie i twardnienie	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ chlorki</li> <li>■ nieorganiczne – sole sodu i potasu, szczególnie siarczany, w mniejszym stopniu węglany</li> <li>■ azotki i azotany</li> <li>■ organiczne – tri etanoloamina, mrowczan sodu lub wapnia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ czas wiązania</li> <li>■ ciepło hydratacji</li> <li>■ wczesna i długoterminowa wytrzymałość na ściskanie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ właściwości reologiczne mieszanki</li> <li>■ zawartość powietrza</li> </ul>
Domieszki napowietrzające	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ tłuszcze i oleje pochodzenia zwierzęcego lub roślinnego oraz kwasy tłuszczowe</li> <li>■ naturalne żywice dające z CaO sole kwasów żywicznych lub z dodatkiem NaOH, mydła kwasu żywicznego</li> <li>■ sole sodowe lub potasowe kwasów sulfonowych lub alkilo-siarkowych.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ zawartość powietrza w mieszance</li> <li>■ rozkład porów w mieszance i stwardniałym betonie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ właściwości reologiczne mieszanki</li> <li>■ wytrzymałość na ściskanie</li> </ul>

\* Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

logiczne, a ich spełnienie oznacza uzyskanie zamierzonego efektu stosowania domieszki najmniejszym kosztem.

Warunkami koniecznymi do osiągnięcia oczekiwanego rezultatu modyfikacji właściwości mieszanki betonowej i/lub betonu domieszkami są prawidłowe zaprojektowanie składu modyfikowanego betonu oraz prawidłowa technologia wykonania betonu. W przypadku źle zaprojektowanego lub wykonanego betonu nie należy oczekiwać, że domieszki przyniosą pożądane efekty. Żadna domieszka nie zmieni złego betonu w dobry.

## Czynniki technologiczne wpływające na efektywność domieszek

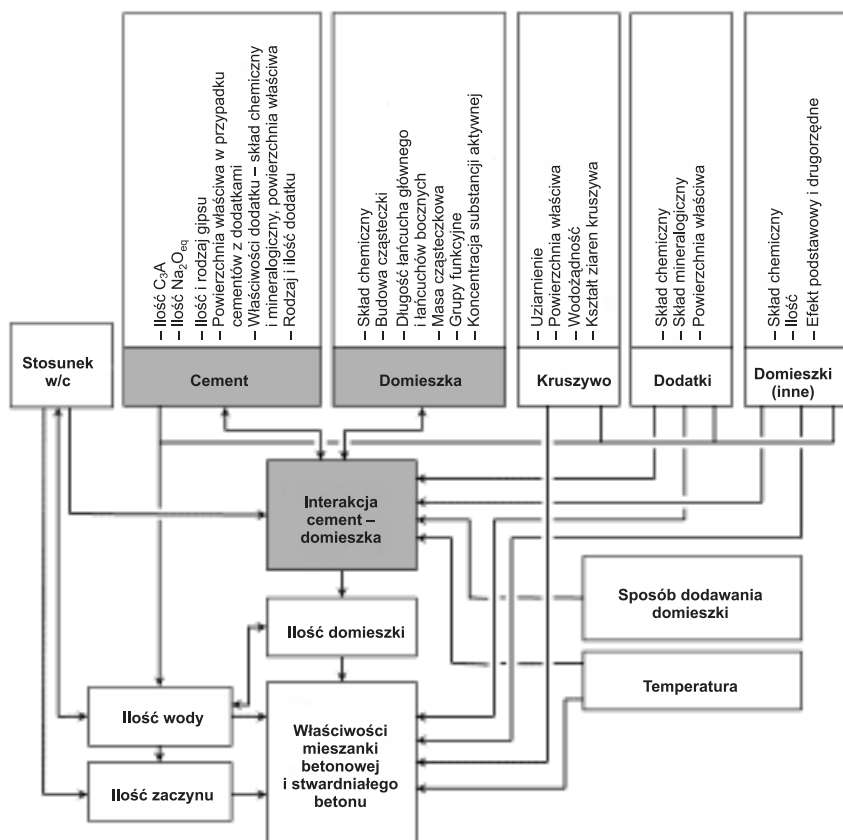
Skuteczność działania domieszek zależy od wielu czynników technologicznych, z których najistotniejsze to [2, 4, 5, 6]:

- właściwości domieszki – skład chemiczny, koncentracja substancji aktywnej, masa cząsteczkowa i budowa strukturalna polimerów w niej zawartych;
- skład chemiczny i mineralny (przede wszystkim zawartość  $C_3A$ ,  $Na_2O_e$ ,  $SO_3$  w cemencie i rodzaj siarczanu wapnia) oraz powierzchnia właściwa cementu i rodzaj cementu (rodzaj i ilość dodatków mineralnych);
- ilość dodanej domieszki;
- obecność w mieszance innych domieszek chemicznych;
- rodzaj i właściwości dodatków mineralnych, w szczególności dodatków aktywnych chemicznie;
- skład mieszanki (stosunek w/c, rodzaj i uziarnienie kruszywa, stopień wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem lub zaprawą);
- moment dodania domieszki w stosunku do zmieszania cementu z wodą;
- czas mieszania;
- temperatura mieszanki.

Każdy z wymienionych czynników wpływa na skuteczność działania domieszek, przy czym może się ona zmienić znacznie w wyniku interakcji tych czynników (rysunek). Szczególnie ważna jest zależność efektów działania domieszek od właściwości cementu, czyli tzw. kompatybilność domieszki z cementem.

## Kompatybilność domieszki z cementem i jej istota

W ujęciu technicznym za kompatybilną z cementem należy uznać taką domieszkę, której stosowanie umożliwia uzyska-



Schemat powiązań między podstawowymi czynnikami wpływającymi na efektywność działania domieszek oraz właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu

nie wymaganych właściwości mieszanki i/lub stwardniałego betonu, ale z najmniejszym jej dodatkiem oraz przy minimalnych efektach ubocznych. W ujęciu ogólnym takie podejście należy uzupełnić o aspekt ekonomiczny, a więc najmniejszy koszt uzyskania oczekiwanego efektu oraz aspekt technologiczny, czyli m.in. wrażliwość domieszki na zmiany warunków jej stosowania (np. zmiany składu i właściwości składników betonu, temperatury), dokładność i sposób dozowania oraz bezpieczeństwo stosowania.

Podstawą doboru cementu są przede wszystkim wytrzymałość betonu, wymagania dotyczące rodzaju i warunków wykonywania konstrukcji oraz eksploatacji, w tym głównie rodzaju korozyjnego oddziaływania środowiska. Wymagania te determinują klasę i rodzaj cementu. Często określają również jego skład chemiczny i fazowy oraz właściwości fizykochemiczne. Dobór domieszki dokonywany jest zazwyczaj po wcześniejszym wybraniu określonego cementu, tak więc dobiera się domieszki kompatybilną z tym cementem. Należy przy tym zaznaczyć, że zwykle pozostają pewne, czasem nawet duże, możliwości optymalizowania ukła-

du cement – domieszka. W praktyce rzadko jest to wykorzystywane, choć takie podejście może prowadzić do uzyskania znaczących efektów technicznych i ekonomicznych [4, 6].

Istotę problemu kompatybilności cementu i domieszki stanowi interakcja procesu hydratacji cementu i mechanizmu działania domieszki. Może ona wpływać, i zazwyczaj wpływa, na efektywność działania domieszki, proces hydratacji cementu oraz rodzaj i właściwości produktów, wodoządnosc, czas wiązania cementu i ilość ciepła wydzielanego w poszczególnych okresach hydratacji, a wreszcie na mikrostrukturę, wytrzymałość i trwałość stwardniałego zaczynu cementowego i betonu. Z praktycznego punktu widzenia rozpoznanie mechanizmu tej interakcji pozwolić może na przewidywanie efektów działania domieszek i ich wpływu na właściwości betonu (nawet wtedy, gdy stosuje się jednocześnie kilka domieszek), uniknięcie problemów związanych z doбором optymalnego układu cement – domieszka, skuteczne modyfikowanie właściwości mieszanki i betonu z uwzględnieniem specyficznych warunków technologicznych, rozwój i wprowadzanie nowych rodzajów sku-

teczniejszych domieszek, optymalizację składu cementu, a w konsekwencji produkcję lepszego betonu.

Opis mechanizmu interakcji domieszki i cementu wymaga, jak stwierdzono wcześniej, rozpoznania mechanizmu działania domieszki, wpływu procesu hydratacji cementu na mechanizm jej działania oraz obecności domieszki na przebieg i produkty procesu hydratacji cementu. Jest to zadanie niezwykle skomplikowane. Efektywność domieszek zależy od ich składu chemicznego, koncentracji substancji aktywnej, masy cząsteczkowej i budowy strukturalnej polimerów w nich zawartych. Domieszki mogą pozostawać w zaccynie w stanie wolnym (w stanie stałym lub częściowo rozpuszczonym), adsorbować na powierzchni ziaren cementu i produktach hydratacji, istotnie wpływając w ten sposób na przebieg procesu hydratacji i powstające w jego wyniku produkty bądź tworzyć ze składnikami cementu lub produktami ich hydratacji nowe związki chemiczne. W zależności od tego w różny sposób i z różną intensywnością wpływają na przebieg procesu hydratacji cementu. Skład i właściwości cementu determinują przebieg procesu hydratacji i powstające w jego trakcie produkty hydratacji, co może bardzo silnie wpływać na mechanizm działania domieszki. Pomimo wielu badań, mechanizm działania żadnej z obecnie stosowanych domieszek, choć ogólnie znany, nie został rozpoznany ilościowo w stopniu wystarczającym do praktycznego stosowania. Zagadnienie to jest w dalszym ciągu przedmiotem intensywnego zainteresowania badawczego, czego efektem są liczne publikacje naukowe i techniczne. Trudności, jakie należy przy tym pokonać, dobrze ilustruje przykład najlepiej dotychczas zbadanego mechanizmu działania superplastyfikatorów.

Powszechnie przyjmuje się, że działanie superplastyfikatorów polega na ich adsorpcji na powierzchni ziaren cementu i produktach hydratacji, a następnie deflokulacji ziaren cementu w zaccynie w wyniku odpychania elektrostatycznego i efektu sterycznego oraz w mniejszym stopniu w wyniku zmniejszenia napięcia powierzchniowego wody i efektu smarowego [1 – 7]. Efektywność superplastyfikatorów zależy od ich składu chemicznego, budowy strukturalnej i masy cząsteczkowej zawartych w nich polimerów. Każdy z obecnie stosowanych rodzajów superplastyfikatorów łączy w sobie w różnym

stopniu podstawowe mechanizmy działania, np. superplastyfikatory SNF i SMF działają przede wszystkim przez efekt elektrostatycznego odpychania, natomiast w przypadku superplastyfikatorów PC i PE dominuje efekt steryczny, a pozostałe z wymienionych mechanizmów występują w mniejszym stopniu. Superplastyfikatory adsorbują na fazach mineralnych cementu oraz produktach hydratacji cementu, wykazując przy tym preferencję do adsorpcji na fazie  $C_3A$ , w początkowym okresie hydratacji najbardziej reaktywnej fazie mineralnej cementu, oraz na produktach jej hydratacji. W ten sposób superplastyfikatory blokują zarodnikowanie i hamują wzrost hydratów, pośrednio istotnie wpływając na przebieg procesu hydratacji. Efekt ten jest tym większy, im większa jest powierzchnia właściwa cementu. Ważnym czynnikiem wpływającym na efektywność superplastyfikatorów jest zawartość alkaliów w cemencie, bowiem wpływają one na zdolność absorpcyjną superplastyfikatorów. W przypadku SNF stwierdzono, że optymalna zawartość alkaliów, ze względu na ich skuteczność, to 0,5 – 0,7%  $Na_2O_e$ , natomiast skuteczność PC i PE jest tym większa, im mniej alkaliów w cemencie. Ważna jest nie tylko całkowita absorpcja superplastyfikatora, ale również jego ilość pozostająca niezaadsorbowana w zaccynie – im jest go więcej, tym lepsze utrzymanie efektu upłynnienia w czasie. Wreszcie efektywność superplastyfikatorów zależy od rodzaju regulatora wiązania i stopnia odwodnienia gipsu. Wszystkie wymienione czynniki są ze sobą ściśle powiązane, a wpływ na mechanizm interakcji cementu z superplastyfikatorem mogą mieć także inne czynniki technologiczne, np. sposób dodawania superplastyfikatora, czas mieszania czy temperatura. Badania mechanizmu interakcji cement – superplastyfikator omówiono szczegółowo m.in. w pracach [4, 6, 7]. Podjęto wiele prób powiązania mechanizmu działania superplastyfikatora z efektem upłynnienia [8 – 11]. Zależności te wykorzystano do opracowania przedstawionego w [11] modelu, pozwalającego na przewidywanie zmian granicy płynięcia zaccynu w wyniku dodania superplastyfikatora na podstawie jego wpływu na siłę działającą między ziarnami cementu. Model ten nie jest skomplikowany matematycznie, ale wyliczenie siły działającej pomiędzy ziarnami cementu, a tym samym określenie efektu

działania superplastyfikatora na właściwości reologiczne zaccynu wymaga doświadczonego określenia wielu parametrów opisujących złożony układ, jakim jest hydratający cement w obecności superplastyfikatora. Sprawia to, że jego praktyczna przydatność jest wątpliwa.

Prostsze, określone doświadczenie zależności pozwalające na wstępną ocenę współdziałania cementu z superplastyfikatorem przedstawiono w przypadku superplastyfikatorów SNF w pracy [12] oraz superplastyfikatorów PC i PE [13]. W obu przypadkach posłużono się współczynnikami opracowanymi na podstawie analizy danych doświadczalnych, umożliwiającymi jakościowe porównanie ze sobą podatności na upłynnienie za pomocą superplastyfikatorów mieszanek z różnymi cementami CEM I. W przypadku superplastyfikatorów SNF współczynnik  $F_f$  wylicza się z wzoru:

$$F_f = a \cdot C_3A + C_4AF$$

gdzie:

$C_3A$  – zawartość  $C_3A$  w cemencie [%];  
 $C_4AF$  – zawartość  $C_4AF$  w cemencie [%],  
 współczynnik  $a$  zależy od miakości cementu i wynosi 1, 2, lub 3.

Natomiast w przypadku superplastyfikatorów PC i PE współczynnik  $F_g$  wylicza się z wzoru:

$$F_g = 3,13 \cdot 10^{-3} \cdot S_{wc} \cdot (0,25 \cdot C_3A + 2,33 \cdot Na_2O_e)$$

gdzie:

$C_3A$  – zawartość  $C_3A$  w cemencie [%];  
 $Na_2O_e$  – zawartość  $Na_2O_e$  w cemencie [%];  
 $S_{wc}$  – powierzchnia właściwa cementu [ $m^2/kg$ ].

Potrzebne do wyliczenia współczynników dane to podstawowe parametry cementu podawane przez każdego producenta. Im wartości współczynników  $F_f$  i  $F_g$  jest większa, tym większą ilość superplastyfikatora trzeba dodać w celu uzyskania wymaganego upłynnienia mieszanki, co oznacza, że kompatybilność superplastyfikatora z cementem jest mniejsza. Należy przy tym zaznaczyć, że oba współczynniki nie pozwalają na ilościowe określenie wielkości dodatku superplastyfikatora. Ich stosowanie ułatwia dobór cementu, ale nie eliminuje konieczności doświadczalnego badania kompatybilności superplastyfikatora z cementem.

### Badanie kompatybilności domieszek z cementem

Niepełne rozpoznanie mechanizmu działania domieszki i ich interakcji z procesem hydratacji cementu oraz fakt, że zwykle informacje podawane przez

ducentów na temat składu i właściwości domieszek są szczątkowe, sprawiają, że w praktyce stosowanie domieszek opiera się na doświadczalnych badaniach ich efektywności i kompatybilności z cementami. Efektywność działania domieszek powinna być wyznaczana jako funkcja określonych, występujących w danej sytuacji czynników technologicznych.

Mnogość czynników technologicznych wpływających na efektywność działania domieszek i ich wzajemne interakcje utrudniają badanie i ocenę ich kompatybilności z cementem. Wyniki badań są w pełni przydatne do bezpośredniego zastosowania tylko pod warunkiem właściwej identyfikacji warunków wykonania betonu i w ograniczonym stopniu mogą być stosowane w warunkach odmiennych. Szczególną uwagę należy zwracać na zmianę właściwości składników mieszanki, stosowanie różnych dodatków i domieszek oraz zmianę temperatury. Badania kompatybilności domieszki z cementem powinno się wykonywać za każdym razem, gdy zmieniają się warunki wykonania betonu. W tym aspekcie bardzo przydatne i efektywne okazuje się stosowanie planów badań opartych na statystycznych procedurach optymalizacji doświadczalnej lub metodach powierzchni odpowiedzi. Badania są planowane w przestrzeni wieloczynnikowej, obejmującej w przewidywanym zakresie zmienności wszystkie czynniki technologiczne wpływające na efektywność działania domieszki. Przydatne mogą być np. plany badań przedstawione w [14, 15] lub standardowo umieszczane w programach do analiz statystycznych. W wyniku takich badań określaną jest funkcja współdziałania (kompatybilności) badanych układów cement – domieszka lub funkcja efektywności działania domieszki (jeśli wcześniej określono rodzaj cementu) w układzie zmiennych czynników technologicznych. Korzystając z takiej funkcji, można dla danych warunków wybrać optymalny układ cement – domieszka lub optymalną domieszkę oraz dokonać odpowiednich działań korygujących w przypadku gdy warunki te zmieniają się w przyjętym wcześniej zakresie.

Przy doborze kompatybilnego układu cement – domieszka szczególną uwagę należy zwrócić na metodę pomiaru efektu podstawowego i efektów drugorzędnych. Sposób ten powinien charakteryzować się adekwatnością metodyki pomiaru efektu podstawowego do jego natury

oraz wymaganą dokładnością i powtarzalnością, jednocześnie będąc możliwie prostym i tanim. Ogólnie przyjmuje się, że w przypadku określania właściwości reologicznych mieszanek betonowych najlepiej stosować techniki z wykorzystaniem specjalnych reometrów [16]. Zebrane dotychczas doświadczenia ze stosowania takich urządzeń do oceny efektywności domieszek uplastyczniających i upłynniających wykazują dużą dokładność i wiarygodność wyników. Ze względu na stopień skomplikowania pomiaru i koszt reometru w większości przypadków jego stosowanie nie jest celowe, a badania mogą być wystarczająco skutecznie wykonane testami technicznymi, np. testem opadu stożka lub rozplywu. Testy reometryczne są natomiast zwykle konieczne w przypadku projektowania mieszanek betonowych o specjalnych wymaganiach dotyczących urabialności i mieszanek betonowych betonów nowej generacji.

Badanie efektów działania domieszek najlepiej wykonywać na mieszance betonowej, ale ze względu na koszty i pracochłonność rzadko są w ten sposób wykonywane. Zwykle wykonuje się je na zaczynie lub na zaprawie. Ze względu na podobieństwo zaprawy i betonu lepiej wykonywać je na zaprawach. Możliwości stosowania zapraw do przewidywania efektów działania domieszek omówiono w publikacjach [3 – 5].

## Podsumowanie

W świetle obecnego stanu wiedzy efektywność działania domieszek i ich kompatybilność z cementem należy określać doświadczalnie, kompleksowo uwzględniając wpływ czynników technologicznych w przewidywanym zakresie ich zmienności. W miarę możliwości należy stosować podejście optymalizujące nie dobór domieszki do cementu, ale układ cement – domieszka. Za kompatybilną z cementem uznaje się taką domieszkę, której stosowanie umożliwia uzyskanie wymaganych właściwości mieszanki i/lub betonu, ale z najmniejszym jej dodatkiem oraz przy minimalnych efektach ubocznych. W ujęciu praktycznym uwzględnić należy aspekt ekonomiczny, a więc najmniejszy koszt uzyskania oczekiwanego efektu oraz aspekt technologiczny, czyli m.in. wrażliwość domieszki na zmianę warunków jej stosowania (np. zmianę składu i właściwości składników betonu, temperaturę), dokładność i sposób jej dozowania oraz bezpieczeństwo stosowania.

## Literatura

- [1] Neville A. M.: Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2000.
- [2] Łukowski P.: Domieszki do zaprawy i betonu. Kraków: Polski Cement, 2003.
- [3] Szwabowski J., Gołaszewski J.: O ocenie efektywności działania domieszek uplastyczniających i upłynniających do betonu w świetle norm europejskich. Cement Wapno Beton, 4/1999, s. 124 – 127.
- [4] Gołaszewski J.: Kształtowanie urabialności mieszanki betonowej superplastyfikatorami. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Budownictwo z. 99, Gliwice 2003, s. 215.
- [5] Gołaszewski J.: Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych w układzie zmiennych czynników technologicznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Budownictwo z. 106, Gliwice 2006, s. 157.
- [6] Kurdowski W.: Chemia cementu i betonu. Wydawnictwo Polski Cement, Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków, Warszawa, 2010.
- [7] Kucharska L.: Tradycyjne i współczesne domieszki do betonu zmniejszające ilość wody zarobowej. Cement Wapno Beton, 2/2000, 46 – 60.
- [8] Nawa T., Euguchi H.: Effect of cement characteristics on fluidity of cement paste containing an organic admixture. 9th International Conference on the Chemistry of Cement, 1992, 597 – 603.
- [9] Ohta A., Uomoto T.: Fluidizing mechanism of polycarboxylate-based superplasticizers for several binder materials. International Congress „Creating with Concrete, University of Dundee, Dundee, UK 1999.
- [10] Yamada K., Hanehara S.: Working mechanism of polycarboxylate superplasticizer considering the chemical structure and cement characteristics. 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC) „Cement's Contribution to the Development in the 21st Century”, Durban, South Africa 2003, 538 – 549.
- [11] Flatt R. J., Bowen P., Houst Y. F., Hofmann H.: Modelling interparticle forces and yield stress of cement suspensions. 11th International Congress on the Chemistry of Cement „Cement's Contribution to the Development in the 21st Century”, Durban, South Africa 2003, 618 – 626.
- [12] Hanna E., Luke K., Perraton D., and Aitcin P. C.: Rheological Behavior of Portland Cement in the Presence of Superplasticizer. ACI SP-19, 1989, pp. 171 – 188.
- [13] Gołaszewski J.: Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance. Construction and Building Materials, Volume 35, October 2012, str. 586 – 596.
- [14] Polański Z.: Metodyka badań doświadczalnych. Politechnika Krakowska, Kraków 1981.
- [15] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
- [16] Szwabowski J.: Reologia mieszanek na spoiwach cementowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.