

# Rozwój domieszek do betonów nowej generacji

Beton cementowy, najpowszechniej dziś stosowany materiał budowlany, podlega nadal stałemu rozwojowi. Rozwój ten odbywa się w przeważającej mierze przez modyfikację materiałową, a jednym z jej podstawowych kierunków jest stosowanie coraz doskonalszych – skuteczniejszych i wydajniejszych – domieszek, to jest substancji dodawanych do mieszanki betonowej w ilości nieprzekraczającej 5% masy cementu. Z drugiej strony, postęp w technologii betonu przejawia się także w coraz szerszym stosowaniu betonów nowej generacji, takich jak beton samozagęszczalny, beton wysokiej wytrzymałości itp. Wiele zagadnień związanych ze stosowaniem domieszek do tych nowoczesnych kompozytów budowlanych stanowi przedmiot zainteresowania naukowców i inżynierów. W niniejszym artykule przedstawiono niektóre spośród szczególnie interesujących osiągnięć z tej dziedziny, o jakich donosili badacze w ostatnim okresie.

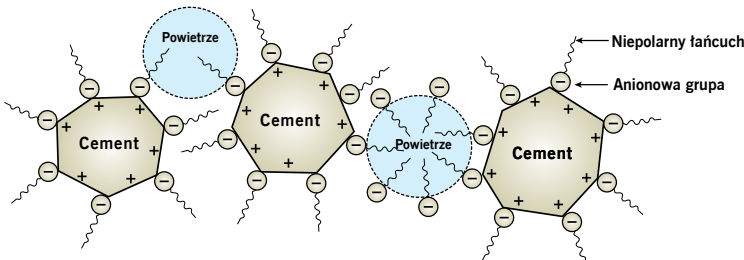
## Wpływ domieszek na właściwości betonu samozagęszczalnego

Niedawne wprowadzenie do stosowania normy europejskiej dotyczącej wymagań stawianych betonowi samozagęszczalnemu, PN-EN 206-9:2010 „Dodatkowe zasady dotyczące betonu samozagęszczalnego (SCC)”, wraz z pakietem norm na badania właściwości mieszanek samozagęszczalnych

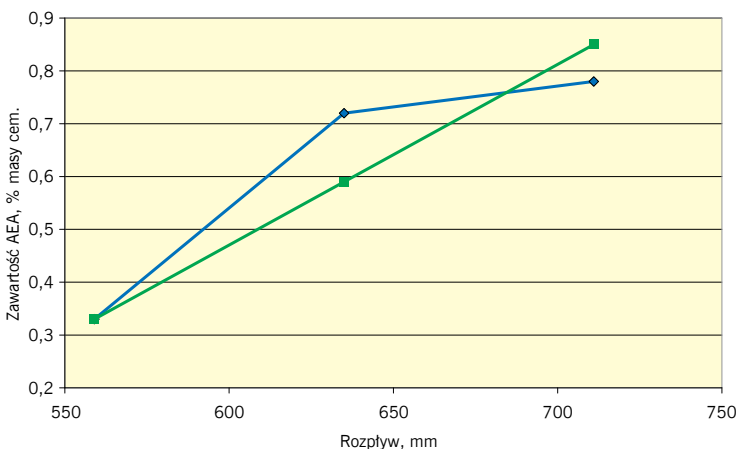


foto: Gregorz Bajorek

(PN-EN 12350:2012, części 8 do 12), jest wymownym świadectwem stale rosnącego znaczenia tego nowoczesnego materiału budowlanego. Coraz szersze stosowanie betonów samozagęszczalnych (SCC – Self-Compacting Concrete) skutkuje również pewną liczbą wymagających rozwiązania problemów związanych z ich wytwarzaniem i użytkowaniem. Jednym z najistotniejszych zagadnień jest tu kwestia zapewnienia odpowiedniej trwałości SCC, w tym szczególnie istotnej w tym kontekście mrozoodporności, osiąganej przez napowietzenie betonu. Beton napowietrzony jest znany od blisko 70 lat – pierwsze domieszki napowietrzające pojawiły się na rynku w latach pięćdziesiątych XX wieku. Domieszki napowietrzające są zbudowane z grup hydrofobowych (np. łańcuchów węglowodorowych), oraz elementów zdolnych do dysocjacji (w środowisku wodnym) z utworzeniem grup hydrofilowych (np.  $-SO_3^-$  lub  $-COO^-$ ). Część hydrofilowa domieszki łączy się z powierzchnią fazy stałej, a część niepolarna – hydrofobowa, jest skierowana w stronę wody. W rezultacie powierzchnia ziaren cementu ulega hydrofobizacji; adsorbują się na niej pęcherzyki powietrza, utrzymywane przez niepolarne łańcuchy (rys. 1). Domieszki napowietrzające zmniejszają napięcie powierzchniowe wody i przeciwdziałają łączeniu się pęcherzyków powietrza. Rezultatem jest stabilizacja pęcherzyków w mieszance betonowej, a następnie w betonie stwardniałym. Pęcherzyki te, o rozmiarach do 250  $\mu m$ , równomiernie rozłożone, pełnią rolę ko-

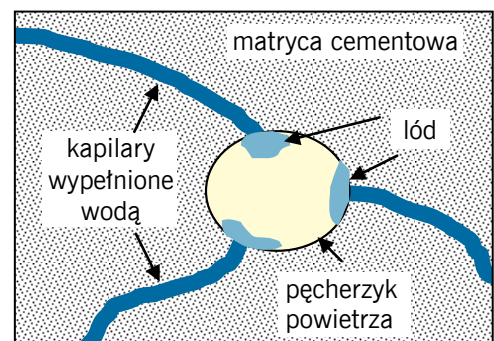


Rys. 1. Mechanizm działania domieszki napowietrzającej w mieszance betonowej



Rys. 3. Zawartość domieszki napowietrzającej konieczna do uzyskania 6% napowietżenia SCC przy różnych ciekłościach mieszanki betonowej; dane na wykresie dotyczą dwóch różnych domieszek AEA (na podst. Barfield i Ghafooriego)

Rys. 2. Struktura betonu napowietzonego



mór kompensujących naprężenia wewnętrzne – woda zamarzająca w kapilarach może się do nich wciskać, nie rozszadając betonu (rys. 2). Ponadto, pęcherzyki przerywają ciągłość kapilar w betonie, co zmniejsza nasiąkliwość wodą. Oba mechanizmy prowadzą bezpośrednio do poprawy mrozoodporności betonu.

Beton samozagęszczalny stanowi układ bardziej skomplikowany pod względem materiałowym niż beton zwykły. Interakcje między składnikami SCC powodują, że zagadnienie właściwego napowietrzenia tego kompozytu również się komplikuje. Według Barfield i Ghafooriego (*Construction and Building Materials*, 1/2012), skuteczność napowietrzenia betonu samozagęszczalnego zależy nie tylko od właściwego doboru jakościowego i ilościowego domieszki napowietrzającej (AEA – Air-Entraining Admixture), ale także od ciekłości mieszanki betonowej oraz interakcji między domieszką upłynniającą a domieszką stabilizującą, tj. zwiększającą spójność mieszanki przez zwiększenie jej lepkości (VMA – Viscosity Modifying Admixture).

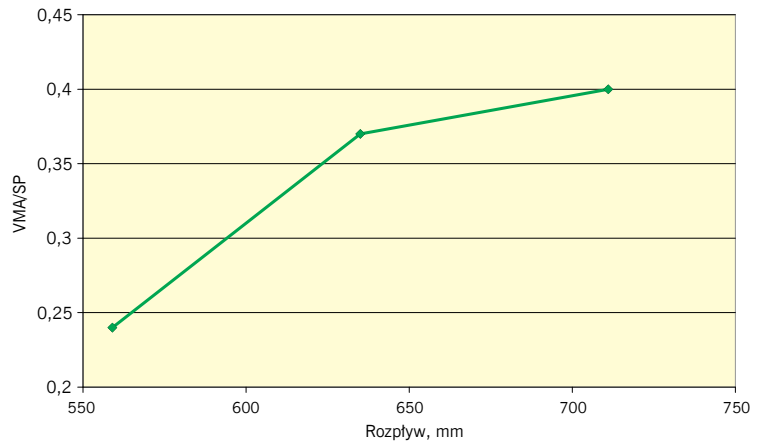
Większe upłynnienie mieszanki betonu samozagęszczalnego powoduje, że aby osiągnąć takie samo napowietrzenie, konieczne jest zastosowanie większej ilości domieszki napowietrzającej (rys. 3). Z drugiej strony, utrzymanie stabilności samej mieszanki oraz uzyskanie właściwej struktury porowatości wymaga stosowania różnych ilości domieszki modyfikującej lepkość – tym większych, im bardziej ciekła jest mieszanka (rys. 4).

Obserwowane zależności są z reguły skomplikowane i często niejednoznaczne, a ich charakter w dużym stopniu zależy od rodzaju (natury chemicznej) domieszki napowietrzającej.

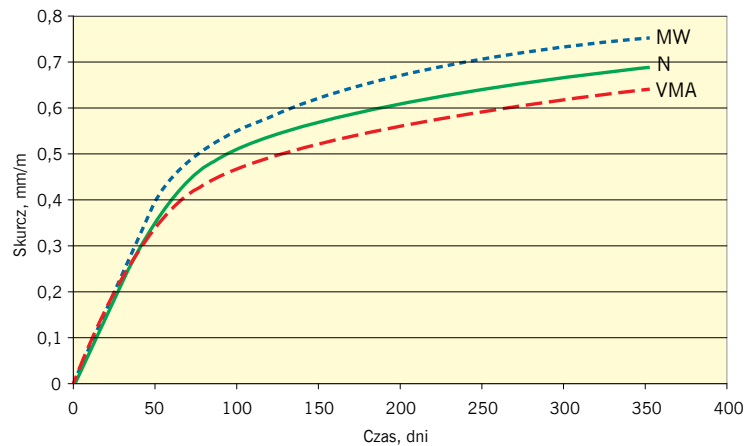
Złożony wpływ różnych składników betonu samozagęszczalnego na jego mikrostrukturę i właściwości jest przedmiotem licznych prac badawczych. Valcuende i wsp. potwierdzili w tym kontekście znaczenie domieszki modyfikującej lepkość (VMA). Wykazali oni (*Construction and Building Materials*, 3/2012), że zastąpienie w mieszance SCC mikrowypełniacza w postaci mączki wapiennej większą ilością VMA prowadzi do pewnego wzrostu zawartości porów o większych rozmiarach (rys. 5a), jakkolwiek wzrost ten nie przekłada się na znaczące zmiany szczelności kompozytu (rys. 5b i 5c).

W innym badaniu naukowcy ci wykazali (*Cement and Concrete Research*, 42 4/2012), że opisana wyżej substytucja mikrowypełniacza domieszką stabilizującą zmniejsza długookresowy skurcz betonu samozagęszczalnego; przy większej zawartości mączki skurcz ten jest większy, a przy większej zawartości VMA – mniejszy niż betonu zagęszczanego przez wibrowanie (rys. 6).

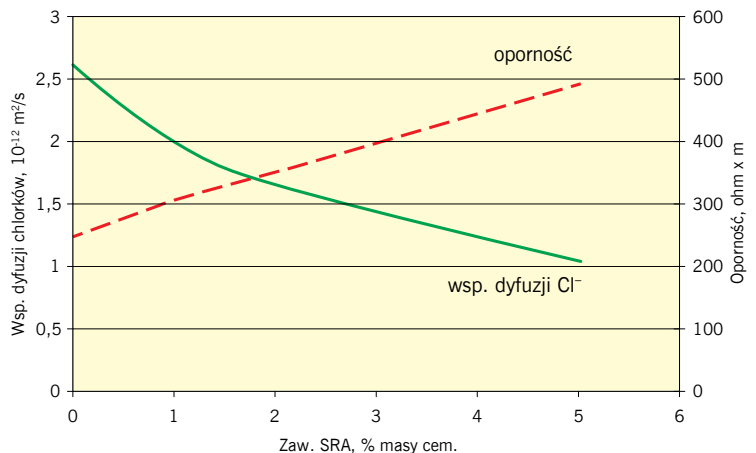
Innym rodzajem domieszki, wywierającym wpływ na właściwości betonu samozagęszczalnego, jest domieszka redukująca skurcz (SRA – Shrinkage



Rys. 4. Proporcja zawartości domieszki stabilizującej (VMA) do upłynniającej (SP), konieczna do uzyskania stabilnej mieszanki i 6% napowietrzenia SCC przy różnych ciekłościach mieszanki betonowej (na podst. Barfield i Ghafooriego)

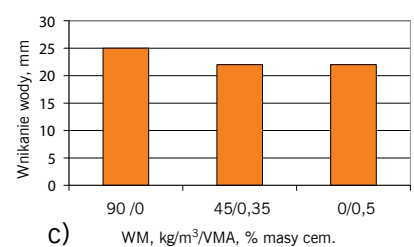
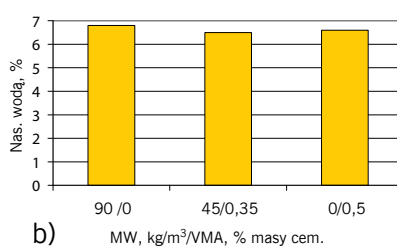
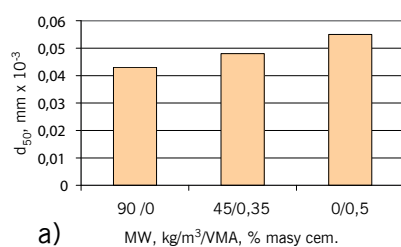


Rys. 6. Przebieg skurczu betonu SCC zawierającego mączkę wapienną (MW) i domieszkę stabilizującą (VMA) w porównaniu z betonem zwykłym (N) (na podst. Valcuende i wsp.)

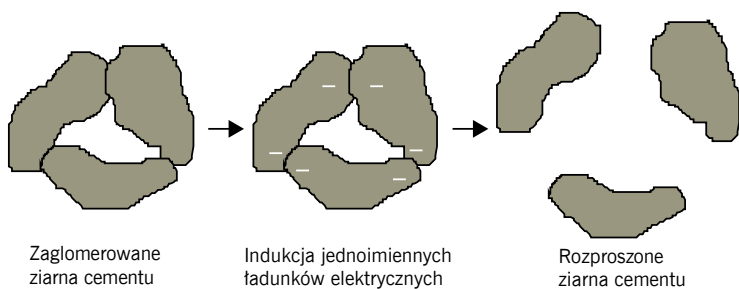
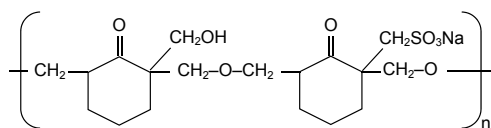


Rys. 7. Zależność współczynnika dyfuzji jonów chlorkowych i oporności elektrycznej betonu samozagęszczalnego od zawartości domieszki redukującej skurcz (na podst. Mai i wsp.)

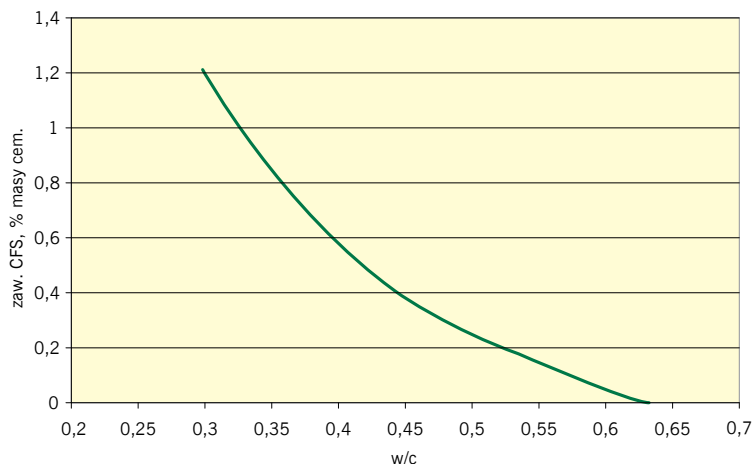
Rys. 5. Zależność rozmiaru porów, do których wnika połowa objętości rtęci w badaniu porozymetrycznym – d50 (a), nasiąkliwości wodą (b) i głębokości wnikania wody pod ciśnieniem (c) od zawartości mączki wapiennej (MW) i domieszki stabilizującej (VMA) w mieszance betonu samozagęszczalnego (na podst. Valcuende i wsp.)



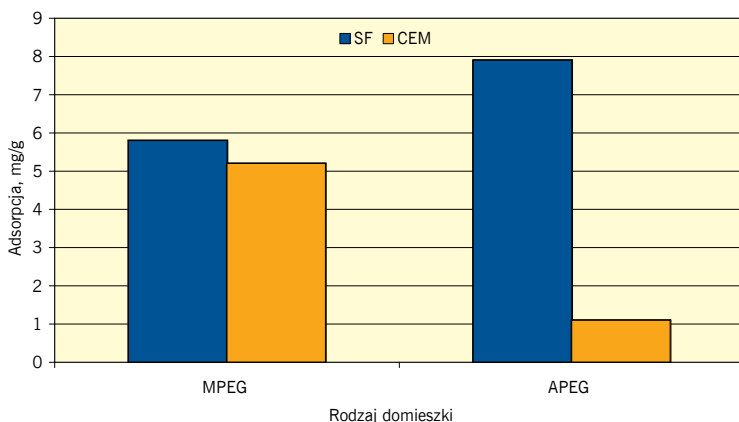
Rys. 8. Polikondensat CFS



Rys. 9. Elektrostatyczny mechanizm upłynnienia mieszanki betonowej

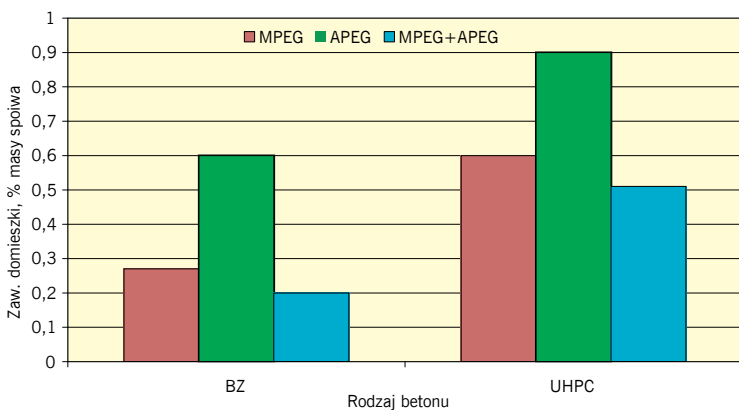


Rys. 10. Zawartość domieszki CFS niezbędna do uzyskania różnych wartości współczynnika woda/cement mieszanki betonowej



Rys. 11. Adsorpcja domieszek upłynniających typu MPEG i APEG na powierzchni ziaren pyłu krzemionkowego (SF) i cementu (CEM) (na podst. Schroeffl i wsp.)

Rys. 12. Zawartość domieszki niezbędna do upłynnienia (rozptyw 26 cm) mieszanki betonu zwykłego (BZ) i betonu ultrawysokowartościowego (UHPC)



Reducing Admixture). Badania Mai i wsp. wykazały (*Construction and Building Materials*, 10/2012), że domieszka ta nie wpływa na zdolność mieszanki do samozagęszczenia. Opóźnione jest wiązanie i twardnienie, na skutek czego wolniej przyrasta wytrzymałość betonu. Natomiast bardzo korzystnie domieszka SRA wpływa na szczelność i odporność korozyjną betonu (rys. 7), co przekłada się na poprawę jego trwałości.

### Nowe rodzaje i nowe zastosowania domieszek upłynniających

W obszarze zainteresowań badaczy niezmiennie pozostają domieszki upłynniające. Mimo znacznej liczby znanych i skutecznie stosowanych rozwiązań, wciąż poszukuje się nowych ich rodzajów. Lei i Plank zaproponowali zastosowanie nowego typu związku cykloalfatycznego, mianowicie polikondensatu cykloheksanonu, formaldehydu i siarczanu(IV) sodu, określanego jako CFS (cyclohexanone-formaldehyde-sulfite) (rys. 8), jako superplastyfikatora o elektrostatycznym mechanizmie działania (rys. 9). Jako podstawową zaletę proponowanego superplastyfikatora badacze podają (*Cement and Concrete Research*, 1/2012) łatwość i ekonomiczną racjonalność jego syntezy, a także dobrą skuteczność przy niskich wartościach współczynnika woda/cement (rys. 10). W niektórych przypadkach postuluje się stosowanie „wyspecjalizowanych” domieszek upłynniających. Schroeffl i wsp. badali skuteczność superplastyfikatorów nowej generacji, opartych na polikarboksylianach, w odniesieniu do betonów ultrawysokowartościowych (UHPC – Ultra-high Performance Concrete). W kompozytach takich stosuje się cement wysokiej klasy wytrzymałości i znaczne ilości (powyżej 15% masy cementu) pyłu krzemionkowego, a wartości współczynnika woda/spoiwo są bardzo niskie (poniżej 0,25). Przywołani badacze wykazali (*Cement and Concrete Research*, 11/2012), że w takim przypadku korzystne jest zastosowanie, zamiast pojedynczej domieszki, mieszaniny dwóch modyfikatorów, różniących się nieco strukturą, a co za tym idzie, powinowactwem do różnych powierzchni mineralnych. Związek typu MPEG (ester kwasu metakrylowego) jest skuteczny w odniesieniu do cementu, na powierzchni którego adsorbuje się względnie łatwo, podczas gdy związek typu APEG (eter allilowy) preferuje adsorpcję na powierzchni ziaren pyłu krzemionkowego (rys. 11). Mieszanina dwóch superplastyfikatorów (MPEG/APEG=6/1) jest w tym przypadku skuteczniejsza niż pojedyncza domieszka (rys. 12).

### Podsumowanie

Stosowanie domieszek jest jednym z ważnych elementów rozwoju współczesnej technologii betonu; domieszki są niezbędne do wytwarzania betonów nowej generacji. Wymaga to jednak głębszego zrozumienia mechanizmów ich działania, w tym zwłaszcza interakcji ze składnikami nowoczesnych odmian betonów. Badania prowadzone w tym obszarze przynoszą wiele interesujących rezultatów, zarazem ukazując wciąż nowe potrzeby badawcze.

**dr hab. inż. Paweł Łukowski, prof. PW**  
**mgr inż. Daniel Wiliński**  
**Wydział Inżynierii Lądowej**  
**Politechnika Warszawska**