



Modyfikacja materiałowa i jej rola w technologii betonu

– spojrzenie z perspektywy dziesięciu konferencji „Dni Betonu”

1. Wstęp

Istotą roli chemii budowlanej w ramach inżynierii materiałów budowlanych jest doskonalenie stosowanych w budownictwie tworzyw przez modyfikację materiałową. Rosnące wymagania ze strony użytkowników narzucają konieczność stałego ulepszania mieszanki betonowej i betonu stwardniałego. Obok doskonalenia betonów zwykłych, rozwijane są także inne ich rodzaje, odpowiadające specyficznym wymaganiom, zależnym od przeznaczenia, sposobu dostawy (transportu), technologii wykonywania itp. Spośród oferowanych modyfikatorów, najbardziej spektakularny wpływ na rozwój technologii betonu wywarły niewątpliwie domieszki. Jest to spowodowane faktem, że w ich przypadku bardzo niewielka – często poniżej 1% masy cementu – ilość modyfikatora może być przyczyną istotnej zmiany właściwości betonu. Domieszki do betonu stanowią obecnie jedną z najszybciej rozwijających się grup materiałów budowlanych. Wraz z dodatkami mineralnymi stanowią one nieodłączne elementy współczesnego betonu, co znalazło swoje odzwierciedlenie w definicji normowej: w PN-EN 206 „Beton” wśród składników betonu

wymienia się domieszki i dodatki. Do betonu wprowadza się również coraz częściej dodatki polimerowe, uzyskując kompozyty polimerowo-cementowe o różnym przeznaczeniu.

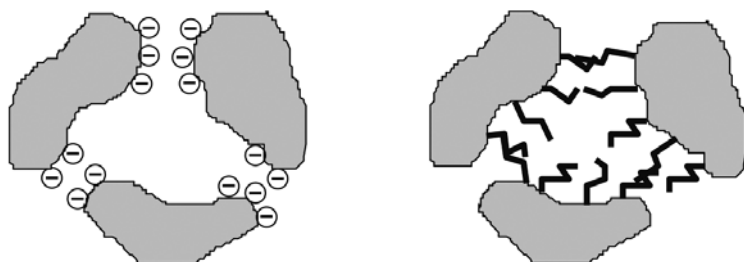
Chemia budowlana odgrywa istotną rolę w zapewnianiu trwałości i niezawodności współczesnego betonu. Modyfikowane betony i zaprawy, środki impregnujące, domieszki o szczególnym przeznaczeniu (np. inhibitory korozji) i inne wyroby z tego obszaru stanowią materiałową podstawę napraw i ochrony przed korozją konstrukcji i elementów z betonu, co udokumentowano w Normach Europejskich z serii PN-EN 1504 „Wyroby i systemy do napraw i ochrony konstrukcji betonowych”.

Tematyka różnego rodzaju modyfikacji materiałowej znajduje swoje odzwierciedlenie w dorobku konferencji „Dni Betonu”, na których była obecna od początku w roku 2000, kiedy odbyła się pierwsza edycja tego wydarzenia – wówczas pod nazwą „Beton na Progu Nowego Millennium”.

2. Chemia budowlana na progu nowego millennium

Tak jak obecnie, również u progu XXI stulecia najpowszechniej stosowanymi modyfikatorami betonu były domieszki, to znaczy substancje wprowadzane do mieszanki betonowej w ilości nieprzekraczającej 5% masy cementu. Dominującą pozycję wśród domieszek do betonu zajmowały plastyfikatory i superplastyfikatory. Wśród tych ostatnich najbardziej rozpowszechnione były domieszki naftalenowo-formaldehydowe (SNF) i melaminowo-formaldehydowe (SMF), które zastąpiły powszechnie wykorzystywane wcześniej lignosulfoniany (LS). Domieszki te upłynniają mieszankę betonową przede wszystkim

Rys. 1. Podstawowe mechanizmy upłynniania mieszanki betonowej przez domieszki, od lewej: efekt elektrostatyczny i efekt steryczny



przez efekt elektrostatyczny; polega on na indukowaniu na powierzchni ziaren cementu jednoimiennych ładunków elektrycznych, powodujących ich wzajemne odpychanie się, przeciwdziałające zbrilaniu cementu w mieszance betonowej. Na rynku były już obecne superplastyfikatory polikarboksylanowe (PCE), które nazwano „domieszkami nowej generacji”; w przypadku tych modyfikatorów podstawową rolę w upłynnieniu mieszanki betonowej odgrywa niezwykle efektywny mechanizm steryczny – długie łańcuchy polimeru fizycznie uniemożliwiają ziarnom cementu zbliżanie się do siebie (rys. 1).

Spośród innych rodzajów domieszek istotną rolę odgrywały środki napowietrzające, pozwalające na ukształtowanie w betonie struktury porowatości sprzyjającej odporności tworzywa na działanie mrozu (rys. 2).

W obszarze domieszek do betonu dobrze ustaloną pozycję miały również środki opóźniające wiązanie betonu, przede wszystkim fosforanowe. Wśród przyspieszaczy, ze względu na zaprzestanie stosowania domieszek zawierających chlorki, trwały intensywnie poszukiwania ich skutecznych zamienników; najczęściej stosowanymi domieszkami przyspieszającymi i przeciwmrozowymi stały się azotany, azotyny i tiocyjaniany.

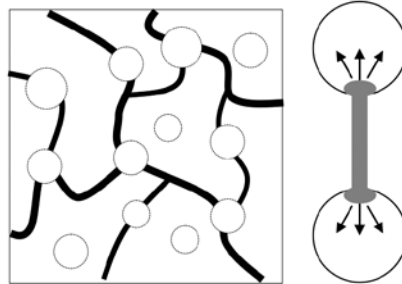
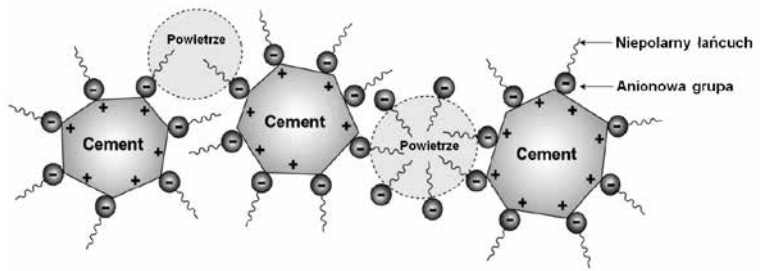
Opublikowana w roku 2000 Norma Europejska EN 206-1, dotycząca betonu, wśród wielu istotnych innowacji przyniosła także uporządkowanie w obszarze dodatków mineralnych do betonu. Kluczową rolę odegrała tu z jednej strony spójna klasyfikacja, z logicznym podziałem na dodatki prawie obojętne i dodatki o właściwościach pucolanowych lub utajonych właściwościach hydraulicznych (rys. 3), z drugiej koncepcja współczynnika k, wyrażającego względną aktywność dodatku w stosunku do cementu i pozwalającego na uwzględnienie dodatków typu II w składzie mieszanki betonowej.

Na początku XXI stulecia coraz szerzej stosowane były betony i zaprawy polimerowo-cementowe. Faza szczególnie intensywnego rozwoju tych materiałów była jednak jeszcze przed nimi, oczekując na sformułowanie właściwych podstaw teoretycznych w postaci modelu tworzenia się mikrostruktury, co nastąpiło w połowie pierwszej dekady.

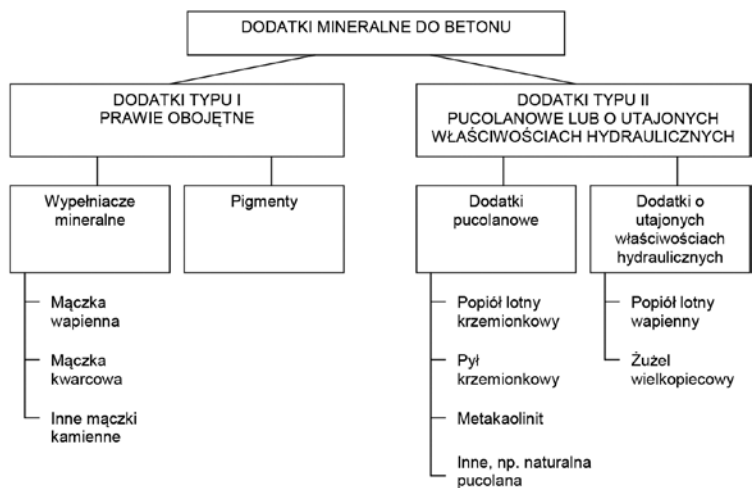
We wprowadzanej sukcesywnie, na przełomie wieków, do stosowania normie PN-EN 1504, poświęconej materiałowi do napraw i ochrony betonu, jako jedną z podstawowych zasad ochrony przyjęto zapobieganie wnikaniu wody do wnętrza betonu; technicznym sposobem realizacji tego celu może być hydrofobizacja powierzchni materiału przez zastosowanie odpowiedniego środka impregnującego (rys. 4).

3. „Dni Betonu” – dwie dekady inspiracji i dokumentowania osiągnięć

Dwie dekady dla dynamicznie rozwijającej się technologii to niemal epoka. Od początku bieżącego stulecia obserwuje się konsekwentny rozwój chemii budowlanej, który zaowocował licznymi spektakularnymi osiągnięciami. Domieszki wpływające na konsystencję mieszanki betonowej nadal stanowiły najliczniejszą grupę modyfikatorów betonu, a wśród nich na czoło zdecydowanie wysunęły się polietery karboksylanowe, które stały się najchętniej stosowanymi superplastyfikatorami.



Rys. 2. Istota zabezpieczenia betonu przed mrozem, od lewej: mechanizm napowietrzającego działania domieszki, struktura betonu napowietrzonego, pęcherzyki powietrza jako komory kompensujące naprężenia generowane przez zamarzającą wodę



O znaczeniu domieszek upłynniających można wnioskować, analizując zmiany niektórych zapisów w dokumentach normalizacyjnych dotyczących betonu. Z jednej strony, wyraźna jest tendencja do zmniejszania zawartości wody w mieszance betonowej (mniejsze w/c). Jednocześnie jednak zaleca się stosowanie mieszanek betonowych o coraz większej ciekkości (tabl. 1). W Normie Europejskiej PN-EN 206-1:2003 nie klasyfikowano już konsystencji wilgotnej (ang. earth moist concrete), a w obecnie obowiązującej PN-EN 206:2014 wśród zalecanych metod oceny konsystencji mie-

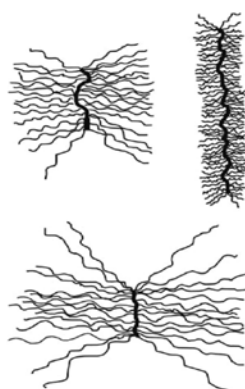
Rys. 3. Klasyfikacja typowych mineralnych dodatków do betonu

Rys. 4. Ochrona betonu przed wnikaniem wody, od lewej: powierzchnia niezabezpieczona, powierzchnia zabezpieczona przez impregnację hydrofobizującą

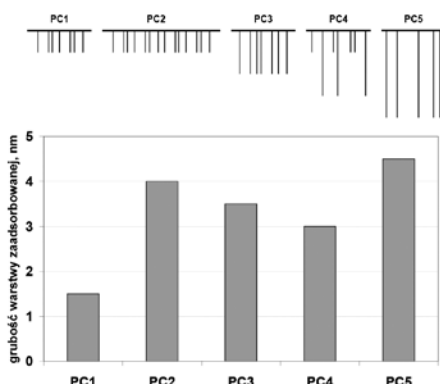


Tabl. 1. Najbardziej ciekła konsystencja, jaką można mierzyć daną metodą

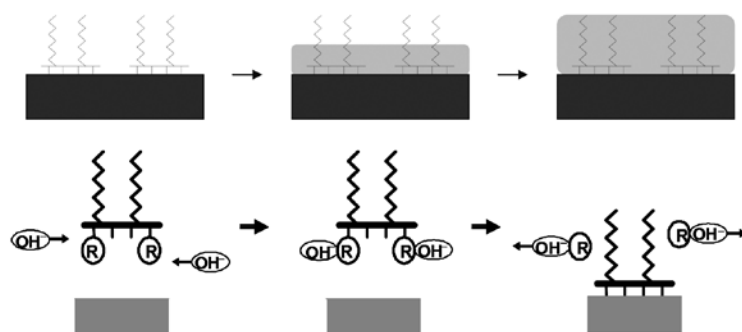
Wg PN-88/B-06250			Wg PN-EN 206-1:2003			Wg PN-EN 206:2014		
Vebe, s	Opad stożka, mm	Rozpływ stożka, mm	Vebe, s	Opad stożka, mm	Rozpływ stożka, mm	Vebe, s	Opad stożka, mm	Rozpływ stożka, mm
< 6	120-150	Nie stosuje się	5-3	> 220	Nie stosuje się	Nie stosuje się	> 220	760-850



Rys. 5. Różne możliwości kształtowania grzebieniowej struktury cząsteczkowej polikarboksylanów i ich wpływ na skuteczność działania domieszki upłynniającej



szanki nie ma metody Vebe, odpowiedniej w przypadku mieszanek o gęstszej konsystencji. Zastąpiła ją metoda rozptywu stożka – dotychczas stosowana tylko w odniesieniu do mieszanek samozagęszczalnych, a więc z definicji wykazujących szczególnie dużą ciekłość. Norma dokumentuje aktualny stan wiedzy i techniki w danej dziedzinie, zatem za dominującą tendencję w technologii betonu trzeba obecnie uznać trend ku bardziej ciekłym mieszankom, zawierającym jednak mniej wody zarobowej.



Rys. 6. Dezaktywacja domieszki upłynniającej przez wbudowanie w powstające produkty hydratacji cementu (u góry) i mechanizm zapobiegający temu zjawisku przez spowolnienie adsorpcji polimeru na powierzchni ziaren cementu

Jednoczesne osiąganie tych rozbieżnych celów jest możliwe przez zastosowanie coraz skuteczniejszych domieszek upłynniających.

Skuteczność działania superplastyfikatorów nowej generacji zależy w znacznej mierze od kształtowania tworzących je makrocząsteczek – łańcuchów polimerowych. Cząsteczki te mają strukturę grzebieniową, tzn. składają się z łańcucha głównego, którego funkcją jest adsorpcja na ziarnie cementu, oraz dołączonych do niego łańcuchów bocznych, których zadaniem jest steryczne przeciwdziałanie zbrylaniu się ziaren cementu i w efekcie upłynnienie mieszanki

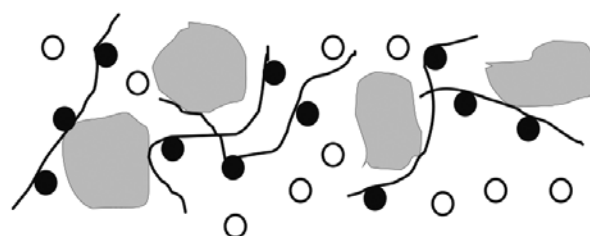
betonowej. Sprawą kluczową z punktu widzenia skuteczności upłynnienia jest właściwy dobór częstości występowania i długości łańcuchów bocznych (rys. 5). Prowadzone w licznych ośrodkach badania i studia, obejmujące zaawansowane symulacje komputerowe, pozwoliły na stwierdzenie, że najkorzystniejsze są względnie rzadko rozmieszczone, długie łańcuchy boczne. Odkrycie to szybko zyskało istotny wymiar praktyczny – współczesna synteza organiczna pozwala na dużą elastyczność w kształtowaniu wewnątrzcząsteczkowej struktury polimerów, co prowadzi do „konstruowania” coraz skuteczniejszych modyfikatorów. Podstawową barierą stanowi tu zazwyczaj koszt wiążący się z koniecznością stosowania zaawansowanych metod nanotechnologicznych i szczególnie starannie wyselekcjonowanych surowców.

Jednym z problemów, wiążących się z upłynnieniem mieszanki betonowej, był zbyt krótki czas działania superplastyfikatorów. Przyczyną stopniowej utraty skuteczności przez domieszkę polimerową jest jej dezaktywacja na skutek otaczania polimeru, zaadsorbowanego na powierzchni cementu, przez produkty hydratacji. Rozwiązaniem jest taka modyfikacja samej domieszki, aby utrudnić jej osadzanie się na ziarnie cementu. W zasadowym środowisku zaczynu cementowego następuje hydroliza, w wyniku której podstawniki blokujące adsorpcję są częściowo usuwane. W ten sposób część polimeru utrzymuje się w fazie ciekłej i ulega adsorpcji stopniowo, upłynniając mieszankę przez długi okres (rys. 6).

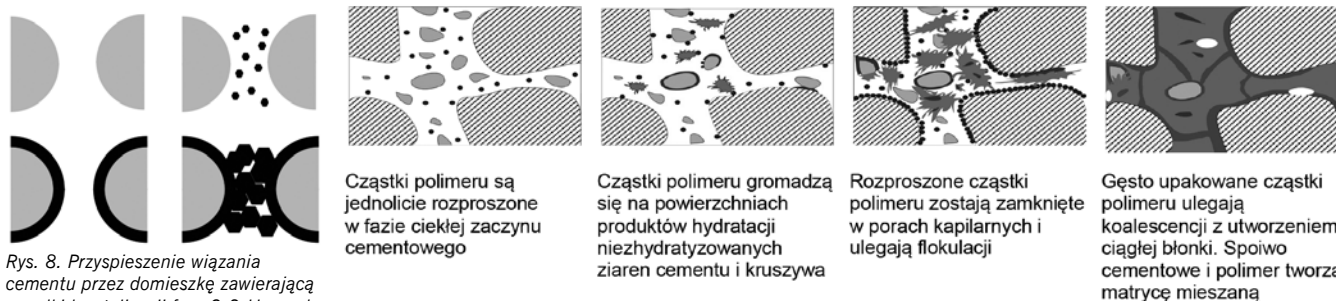
Wyraźny postęp nastąpił także wśród innych rodzajów domieszek. Spektakularne osiągnięcia technologii betonu łączą się zwłaszcza z wprowadzeniem i rozwojem domieszek regulujących lepkość, zwanych też stabilizującymi. Pierwotnie przeznaczone do zapobiegania wyfukiwaniu zaczynu cementowego podczas układania betonu pod wodą (rys. 7), szybko znalazły zastosowanie również w innych obszarach; bez tych modyfikatorów trudno wyobrazić sobie choćby mieszanki samozagęszczalne.

Wspomniana w poprzednim rozdziale konieczność rezygnacji ze stosowania modyfikatorów chlorkowych wymusiła poszukiwanie nowych rodzajów domieszek przyspieszających. Skutecznym, a zarazem całkowicie bezpiecznym dla stali zbrojeniowej rozwiązaniem jest wykorzystanie środka zawierającego zarodki krystalizacji fazy C-S-H. Uwodnione krzemiany wapnia powstają wówczas nie tylko na powierzchni ziaren cementu, ale przede wszystkim w przestrzeniach

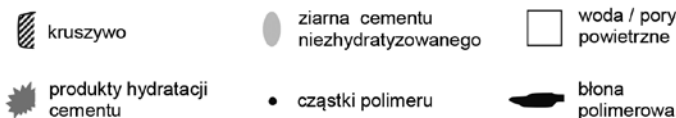
Rys. 7. Mechanizm działania domieszki regulującej lepkość mieszanki betonowej – część cząsteczek wody zostaje związana z łańcuchami polimeru i traci mobilność



- woda swobodna
- woda związana
- cement
- polimer



Rys. 8. Przepięszenie wiązania cementu przez domieszkę zawierającą zarodki krystalizacji fazy C-S-H – szybsze uciężlenie struktury zaczynu, od lewej: bez domieszki, z domieszką



międzyziarnowych, co powoduje szybki rozwój struktury stwardniałego zaczynu (rys. 8).

W zakresie dodatków mineralnych do betonu intensywne prace badawcze były związane zwłaszcza z potrzebą zagospodarowywania coraz większej ilości ubocznych produktów spalania, w tym zwłaszcza popiołów lotnych. Opracowano technologię betonów o bardzo dużej zawartości popiołu (betony „wysokopopiołowe”), sformułowano także podstawy racjonalnego wykorzystania popiołów wapiennych. Rosnące wykorzystanie w przemyśle energetycznym instalacji spalania węgla z paleniskami fluidalnymi wymusza konieczność racjonalnego zagospodarowania i tych popiołów, w tym również jako składników betonu; prace badawcze w tym zakresie są prowadzone od pewnego czasu. W 2005 roku międzynarodowy zespół badaczy z Belgii, Niemiec, Japonii i Polski (A. Beeldens, D. Van Gemert, H. Schorn, Y. Ohama i L. Czarnecki) dokonał przełomu w dziedzinie kompozytów polimerowo-cementowych, formując pełny, zintegrowany model tworzenia się mikrostruktury tego tworzywa w odniesieniu do polimerów termoplastycznych (rys. 9).

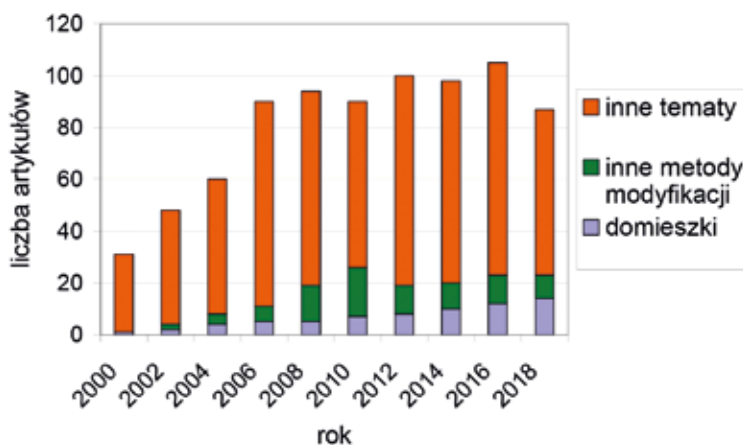
To osiągnięcie teoretyczne przełożyło się na znaczny wzrost – i skuteczność – zastosowań praktycznych. W 2016 P. Łukowski zaproponował uzupełnienie modelu o kompozyty epoksydowo-cementowe. Rosnące znaczenie zagadnień związanych z doskonaleniem betonu przez modyfikację materiałową znalazło odzwierciedlenie w dorobku konferencji „Dni Betonu”. Tematyka ta była od początku obecna w programie konferencji. Przedstawione powyżej osiągnięcia i problemy były omawiane w trakcie sesji problemowych, a dyskusje przenosiły się zwykle do kularów. Liczba referatów poświęconych chemii budowlanej, w tym domieszkom do betonu, rosła w kolejnych edycjach „Dni Betonu” (rys. 10). W 2014 roku organizatorzy i Rada Programowa konferencji, dostrzegając ten trend, ustanowili osobną sesję poświęconą domieszkom do betonu (choć zagadnienia związane z szeroko rozumianą chemią budowlaną są niezmiennie obecne także w innych grupach problemowych). Sprzyja to nie tylko dokumentowaniu rozwoju i osiągnięć, ale także – a może zwłaszcza – inspiracji dla rozwoju.

4. Współczesna modyfikacja materiałowa betonu – perspektywy i wyzwania

Chemia budowlana cieszy się obecnie ustabilizowaną pozycją jako istotny element technologii betonu. Do takiej sytuacji doprowadziły przedsta-

wione w poprzednim rozdziale – z oczywistych powodów w „telegraficznym” skrócie i jedynie wybrane – osiągnięcia modyfikacji materiałowej betonu w ostatnich dwudziestu latach.

Najważniejszym obszarem chemii budowlanej pozostają domieszki do betonu. Liczba ich rodzajów



Rys. 9. Model tworzenia się mikrostruktury kompozytu polimerowo-cementowego zawierającego dodatek polimeru termoplastycznego

rosnąć, co znajduje odzwierciedlenie w kolejnych nowelizacjach poświęconej domieszkom Normy Europejskiej PN-EN 934 (rys. 11).

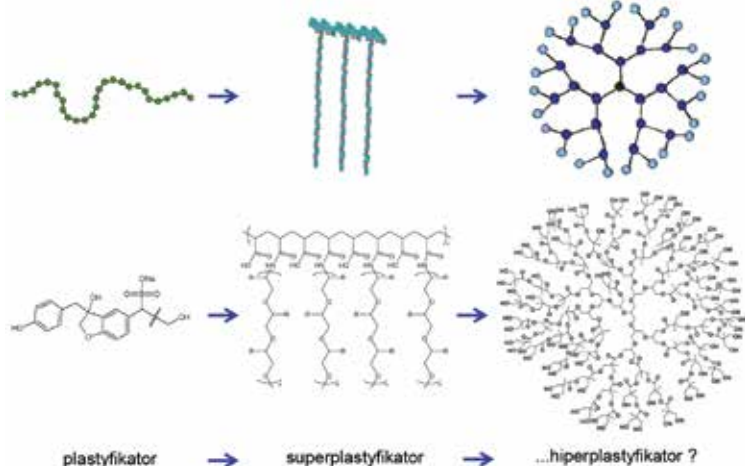
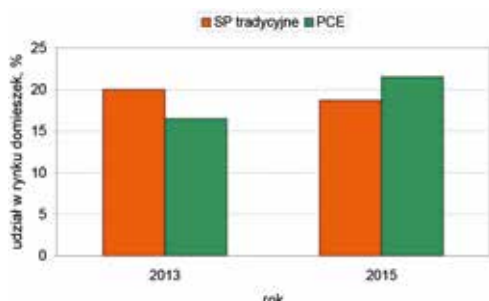
Warto tu zwrócić uwagę, że z różnych powodów wciąż poza normalizacją pozostają niektóre ważne odmiany domieszek, np. domieszki przeciwnakładowe lub inhibitory korozji stali zbrojeniowej. Zasadniczo stabilna pozostaje także wewnętrzna struktura rynku domieszek. Według danych Sto-

Rys. 10. Liczba artykułów dotyczących modyfikacji materiałowej betonu na kolejnych konferencjach „Dni Betonu” na tle ogólnej liczby artykułów

Rys. 11. Rodzaje domieszek do betonu ujęte w PN-EN 934-2



Rys. 12. Udział superplastyfikatorów „tradycyjnych” i polikarboksylicznych w polskim rynku domieszek (wg danych SPChB)

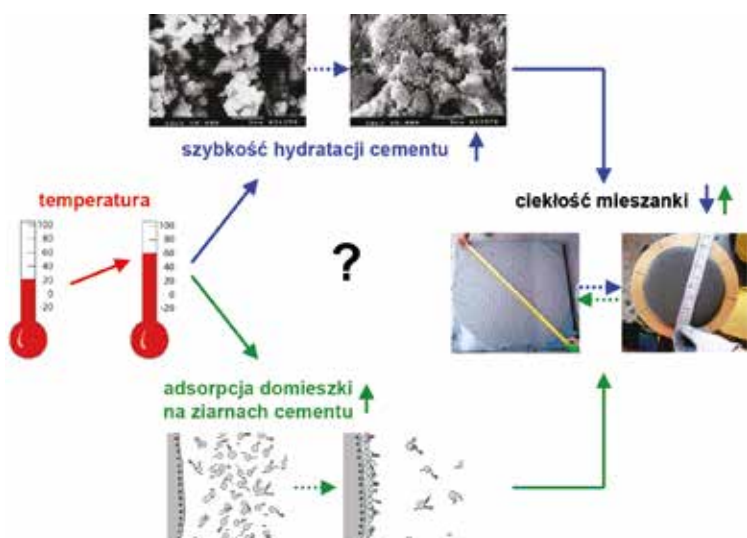


Rys. 13. Rozwój domieszek upłynniających: od plastyfikatorów ku hiperplastyfikatorom – domieszkom przyszłości

warzyszenia Producentów Chemii Budowlanej, domieszki wpływające na konsystencję mieszanki betonowej stanowią ponad 70% rynku, domieszki przyspieszające – 5-6%, domieszki napowietrzające – ok. 3%; domieszki kompleksowe (wielofunkcyjne, mieszane) – ok. 10%, domieszki do betonu wibroprasowanego – ok. 10%. Bardzo charakterystyczna jest natomiast zmiana dokonująca się w obrębie segmentu superplastyfikatorów, gdzie następuje stopniowe ograniczanie stosowania domieszek „tradycyjnych” na rzecz nowoczesnych upłynniaczy polikarboksylicznych – między 2013 a 2015 rokiem te drugie zyskały większy udział w rynku (rys. 12).

Domieszki do betonu pozostaną najpowszechniej stosowanymi modyfikatorami betonu. Próbując przewidzieć tendencje rozwojowe w tym zakresie, trzeba postawić pytanie, czy technologia betonu w dalszym ciągu będzie dążyć do stosowania mieszanek o coraz większej ciekłości. W przypadku

Rys. 14. Ambivalentny wpływ temperatury na skuteczność działania superplastyfikatorów

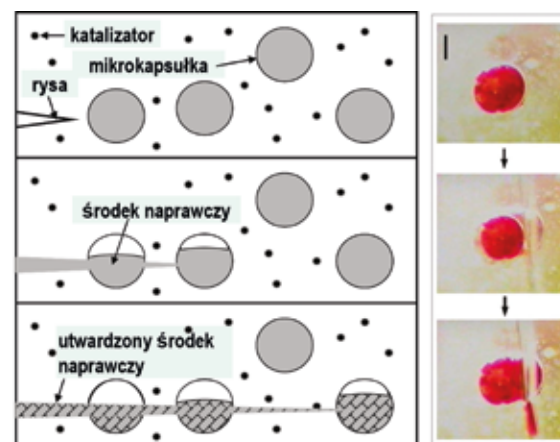


nasuwającej się pozytywnej odpowiedzi, można oczekiwać opracowania kolejnych generacji jeszcze skuteczniejszych domieszek upłynniających; być może po epoce superplastyfikatorów nadejdzie czas na hiperplastyfikatory? (rys. 13).

Postęp w dziedzinie domieszek do betonu nie oznacza bynajmniej rozwiązania wszystkich problemów. Czołowe miejsce na ich liście zajmuje niezmiennie kwestia kompatybilności. Domieszki stają się coraz bardziej skomplikowane pod względem budowy chemicznej i mechanizmów działania, a zarazem coraz częściej występują w układach z innymi modyfikatorami; powoduje to, że do problemu zgodności z cementem dołącza coraz częściej zagadnienie kompatybilności różnych rodzajów domieszek między sobą.

Nierozstrzygnięte jednoznacznie pozostaje zagadnienie wpływu temperatury na skuteczność domieszek upłynniających (rys. 14). Z jednej strony, właściwości technologiczne mieszanek betonowych w podwyższonej temperaturze ulegają pogorszeniu; utrata ciekłości następuje szybciej, jako że ze wzrostem temperatury wzrasta szybkość reakcji chemicznych, a więc i hydratacji składników cementu. Z drugiej strony wzrost temperatury przyspiesza także adsorpcję polimeru na ziarnach cementu, co doraźnie zwiększa ciekłość mieszanki. W przypadku superplastyfikatorów nowej generacji wzrost temperatury prowadzi w większości przypadków do zmniejszenia skuteczności. Przewidywanie skutków zmian temperatury w odniesieniu do działania domieszek jest jednak bardzo trudne bez odpowiednich badań.

Jednym ze szczególnych osiągnięć współczesnej modyfikacji materiałowej betonu jest rozwój betonów określanych jako „autotechnologiczne”, to znaczy pozwalające na znaczne zmniejszenie zakresu i uciążliwości operacji technologicznych przy ich wykonywaniu i użytkowaniu. Przedstawicielem tej grupy kompozytów jest beton samozagęszczalny, który pod własnym ciężarem rozptywa się i zagęszcza, wypełniając deskowanie ze zbrojeniem i zachowując jednorodność. Innym materiałem tego rodzaju jest beton samonaprawialny, niewymagający interwencji z zewnątrz jako reakcji na uszkodzenie. Realizacja tej idei polega na umieszczeniu materiału naprawczego wewnątrz kompozytu na etapie wytwarzania, czyli zanim doszło do uszkodzenia. Dzięki temu środek naprawczy jest dostępny w miejscu i czasie, kiedy staje się nie-



Rys. 15. Koncepcja samonaprawy betonu wg C.M. Dry

zbędne odtworzenie struktury tworzywa (rys. 15). Różne koncepcje nadawania kompozytom budowlanym zdolności do samonaprawy wymagają nierzadko zejścia z modyfikacją na poziom nanometryczny. Ten kierunek badań i rozwoju kompozytów budowlanych jest uważany za obiecujący ze względu na potencjalną użyteczność nanobetonów. Jednakże, pod względem technologicznym nanomodifikacja jest bardzo trudna, gdyż wszelkie modyfikatory tego rodzaju (nanokrzemionka, nanorurki węglowe itp.) wprowadzane do mieszanki betonowej drastycznie pogarszają jej urabialność. Wymagania zrównoważonego rozwoju w budownictwie narzucają konieczność zagospodarowania materiałów odpadowych. W tej sytuacji obserwuje się rosnącą tendencję do wykorzystywania uciążliwych odpadów przemysłowych jako składników betonu. W tej grupie można wymienić, między innymi, popioły lotne wapienne i fluidalne, szlufkę szklaną, odpadowe pyły z produkcji kruszyw mineralnych, gruz betonowy czy też odpadowy pył perlitowy, a nawet tak trudny do utylizacji materiał, jak odpad powstający przy produkcji bieli tytanowej. Odpady te próbuje się wykorzystywać do wytwarzania betonu zwykłego, ale także – co jest trudniejsze ze względu na potencjalną niekompatybilność materiałową ze współspoiwem polimerowym – jako składniki betonów i zapraw polimerowo-cementowych (rys. 16), a nawet żywicznych (bezcementowych).

5. Podsumowanie

Trudno dziś wyobrazić sobie nowoczesną budowlę z betonu, wzniesioną bez użycia modyfikatorów – stosowanie betonu bez udziału odpowiednich domieszek staje się praktycznie niemożliwe. Dzięki nim można wykonywać betony o bardzo niskich wartościach współczynnika w/c (0,24 – 0,32) i wysokich wytrzymałościach (80 – 140 MPa). W wielu krajach z zastosowaniem modyfikatorów chemicznych wykonuje się dziś ponad 80% betonów. Gdyby pokusić się o wybranie głównego powodu, dla którego chemia budowlana odgrywa dziś tak ważną rolę w technologii betonu, to byłby to niewątpliwie fakt, że modyfikacja materiałowa betonu skutecznie odpowiada na większość problemów i wyzwań w tej dziedzinie (tabl. 2).

prof. Paweł Łukowski
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska

Przygotowując niniejsze opracowanie, wykorzystano następujące publikacje i dokumenty:

- Beeldens A., Van Gemert D., Schorn H., Ohama Y., Czarnecki L.: *From microstructure to macrostructure: an integrated model of structure formation in polymer modified concrete. Materials and Structures* 280/2005
- Czarnecki L.: *Chemia budowlana w praktyce. „Materiały Budowlane”* 2/2010
- Czarnecki L., Justnes H.: *Zrównoważony, trwały beton. „Cement, Wapno, Beton”* 6/2012
- Czarnecki L., Kurdowski W., Mindess S.: *Future developments in concrete. „Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete”, Woodhead Publishing Ltd., London* 2008
- Houst Y i in.: *Towards tailored superplasticizers.*

Tabl. 2. Problemy w technologii betonu rozwiązywane przez modyfikację materiałową

Technologia betonu – potrzeby	Modyfikacja materiałowa – rozwiązania
Zwiększenie ciekłości mieszanki betonowej przy niskim w/c	Domieszki upłynniające
Poprawa mrozoodporności betonu	Domieszki napowietrzające
Szybsze narastanie wytrzymałości wczesnej betonu	Domieszki przyspieszające wiązanie i/lub twardnienie
Betonowanie w niskiej temperaturze	Domieszki przeciwmrozowe
Wydłużenie czasu urabialności mieszanki betonowej	Domieszki opóźniające wiązanie
Poprawa szczelności betonu	Domieszki uszczelniające; preparaty hydrofobizujące
Betonowanie pod wodą	Domieszki regulujące lepkość
Zwiększenie wytrzymałości betonu	Pył krzemionkowy
Zmniejszenie kruchości betonu	Polimer jako współspoiwo
Poprawa odporności na wnikanie wody	Impregnacja hydrofobizująca
Barwienie betonu	Pigmenty



„Admixtures – Enhancing Concrete Performance”, Thomas Telford, London 2005

- Jaworska B., Sokołowska J., Łukowski P., Jaworski J.: *Waste mineral powders as components of polymer-cement composites. Archives of Civil Engineering* 4/2015
- Łukowski P.: *Domieszki do zapraw i betonów. Polski Cement, Kraków* 2003
- Łukowski P.: *Modyfikacja materiałowa betonu. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków* 2016
- Łukowski P.: *Domieszki przyspieszające wiązanie i twardnienie betonu. „Budownictwo, Technologie, Architektura”* 2/2014
- Łukowski P., Wiliński D.: *Rozwój domieszek do betonów nowej generacji. „Budownictwo, Technologie, Architektura”* 1/2013

a także artykuły opublikowane w materiałach konferencji „Dni Betonu” 2000-2018 oraz materiały Stowarzyszenia Producentów Chemii Budowlanej

Rys. 16. Obrazy mikrostruktury zaprawy polimerowo-cementowej zawierającej odpadowe pyły mineralne, od lewej: popiół lotny wapienny, odpadowy pył perlitowy

Artykuł został opublikowany w wydawnictwie jubileuszowym „2 dekady Dni Betonu”

