

Projektowanie betonu samozagęszczalnego

1. Wprowadzenie

Betonem samozagęszczalnym nazywa się taki beton, którego skład i składniki dobierane są przede wszystkim ze względu na specyficzne właściwości reologiczne mieszanki, zapewniające jej zdolność do szczelnego wypełnienia formy, otulenia zbrojenia oraz zagęszczenia się pod ciężarem własnym bez potrzeby zagęszczania mechanicznego [1, 2]. Beton samozagęszczalny stanowi jedną z najbardziej znaczących innowacji w technologii betonu w ostatnich latach, a potwierdza to wciąż rosnąca liczba jego aplikacji [2]. Jednakże korzystne efekty stosowania betonu samozagęszczalnego w budownictwie betonowym można uzyskać tylko wtedy, gdy jego projektowanie będzie zapewniać wymagane właściwości zarówno mieszanki, jak i stwardniałego betonu. Jest to zadanie bardziej skomplikowane niż w przypadku betonów zagęszczanych mechanicznie. Czynnikiem determinującym skład betonu samozagęszczalnego jest bowiem urabialność mieszanki, a zakres relacji ilościowych poszczególnych składników, przy których posiada ona wymagane właściwości reologiczne, jest wąski. Konieczne jest więc specyficzne, w szeregu aspektów odmienne od dotychczasowego podejście do jego projektowania. W referacie omówiono algorytm, wymagania, metody oraz podstawowe zalecenia projektowania betonu samozagęszczalnego.

2. Algorytm projektowania betonu samozagęszczalnego

Ogólny algorytm projektowania betonów samozagęszczalnych przedstawiono na rys. 1. Algorytm ten nie odbiega zasadniczo od algorytmu projektowania betonów zagęszczanych w sposób tradycyjny. Podobnie jak przy projektowaniu każdego betonu, pierwszym krokiem jest sformułowanie założeń dotyczących jego podstawowych charakterystyk. Składają się na nie:

- wymagania urabialności związane z rodzajem wykonywanego elementu oraz specyfiką przewidywanych metod i warunków wykonania betonu

- wymagania wytrzymałości wynikające z projektu konstrukcji (najczęściej określane klasą betonu)
 - wymagania trwałości wynikające z warunków eksploatacji konstrukcji (określane klasami ekspozycji).
- Przy projektowaniu betonu samozagęszczalnego wymagania urabialności mają znaczenie pierwszorzędne i ich spełnieniu podporządkowane są kolejne jego kroki, oczywiście przy założeniu, że minimalne wymagania wytrzymałości i trwałości muszą być spełnione. Projektowanie w przedstawionym algorytmie polega na określeniu przedziału wymaganych właściwości reologicznych mieszanki, a następnie kolejno jakościowym doborze składników, wstępnym doborze składu i doświadczalnym jego optymalizowaniu.

Pierwszym etapem projektowania jest określenie wymaganych parametrów reologicznych i klas konsystencji mieszanki samozagęszczalnej ze względu na metody i warunki wykonania procesu betonowania. Wymagania te należy określić w jednostkach odpowiadających stosowanym metodom pomiaru parametrów reologicznych.

Drugim etapem projektowania jest jakościowy dobór składników i składu mieszanki betonowej. Konieczność spełnienia wymagań stawianych właściwościom reologicznym mieszanki determinuje skład betonu samozagęszczalnego oraz właściwości zastosowanych składników. W trakcie tego etapu należy przeprowadzić doświadczalną identyfikację reologicznych efektów działania superplastyfikatora. Trzeci etap projektowania polega na ostatecznym doborze składników i optymalizacji składu betonu ze względu na właściwości reologiczne mieszanki. Najczęściej stosuje się metody kolejnych przybliżeń lub metody analityczno-doświadczalne.

W następnym etapie sprawdza się wrażliwość właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej na niewielkie zmiany składu (ilości wody i superplastyfikatora) i warunków betonowania (przede wszystkim temperatury). Na tym etapie opracowuje się również procedury korygowania składu mieszanki, pozwalające korygować zmiany właściwo-

Rys. 1. Algorytm projektowania betonu samozagęszczalnego



ści mieszanki w zależności od możliwych zmian warunków wykonywania betonu (np. wystąpienia zakłóceń organizacyjnych wydłużających czas betonowania, zmian temperatury w trakcie wykonywania betonowania) lub umożliwiających doraźne stosowanie domieszek, których wpływ na właściwości reologiczne mieszanki nie jest obojętny (np. domieszek napowietrzających, opóźniających). Ostatnim etapem projektowania jest weryfikacja składu mieszanki w warunkach technicznych wytwórni i budowy. Ponieważ właściwości mieszanki samozagęszczalnej zależą od intensywności mieszania oraz objętości zarobu, przed rozpoczęciem jej produkcji należy przeprowadzić próby w celu dopracowania procedury mieszania i potwierdzenia, że w warunkach technicznych spełnione są wszystkie wymagania ze względu na właściwości mieszanki i betonu. Zaleca się również przeprowadzenie próby pompowania mieszanki.

3. Reologiczne wymagania i kryteria samozagęszczalności

Zachowanie się samozagęszczalnych mieszanek betonowych w procesach technologicznych najwygodniej opisywać za pomocą prostego i sprawdzonego w praktyce modelu ciała Binghama [4,5]. W modelu tym właściwości reologiczne mieszanki betonowej charakteryzują dwie stałe materiałowe (parametry reologiczne) – granica płynięcia i lepkość plastyczna. Ich wartość zależy głównie od właściwości składników i składu mieszanki, temperatury oraz czasu, jaki upłynął od chwili zmieszania składników. Z chwilą gdy naprężenia przekroczą granicę płynięcia, następuje płynięcie mieszanki z prędkością zależną od lepkości plastycznej. Im mniejsza będzie lepkość plastyczna mieszanki, tym większa będzie prędkość jej płynięcia przy danym obciążeniu. Ze względu na urabialność mieszanki parametrem o zasadniczym znaczeniu jest granica płynięcia. Jej wielkość warunkuje bowiem wystąpienie płynięcia mieszanki, a więc możliwość prawidłowej realizacji procesów technologicznych. Znaczenie technologiczne lepkości plastycznej w przypadku mieszanek zagęszczanych wibracyjnie jest małe, a o ich urabialności decyduje głównie wartość granicy płynięcia. Jednak w przypadku mieszanek samozagęszczalnych urabialność zależy zarówno od granicy płynięcia jak i lepkości plastycznej. Bardziej szczegółowo zagadnienia reologii mieszanek betonowych omówiono m.in. w [6].

Przy projektowaniu betonu samozagęszczalnego przyjmuje się, że mieszanka będzie samozagęszczalna, jeśli spełni ona w okresie od wytworzenia do ułożenia trzy podstawowe warunki reologiczne [1-5]:

- warunek płynności stanowi, że płynność mieszanki musi być taka, aby zapewnić szybkie i dokładne wypełnienie formy oraz otulenie zbrojenia bez względu na jego ilość i układ. Będzie on spełniony, gdy granica płynięcia i lepkość plastyczna mieszanki będą jak najmniejsze. Im mniejsza granica płynięcia, tym mniejsza będzie wysokość słupa mieszanki wywołująca jej rozptyw i tym lepsze będzie jej spoziomowanie w formie lub deskowaniu. Im mniejsze będą granica płynięcia i lepkość plastyczna mieszanki, tym większa będzie prędkość rozptywu mieszanki i krótszy czas wypełnienia formy

- warunek samoodpowietrzenia stanowi, że mieszanka musi mieć zdolność do samorzutnego i szybkiego odprowadzenia powietrza pod wpływem siły wyporu. Będzie on spełniony, gdy granica płynięcia i lepkość plastyczna mieszanki będą jak najmniejsze. Im mniejsza granica płynięcia i lepkość, tym mniejsze pęcherzyki powietrza będą samoczynnie wydalone z mieszanki pod wpływem siły wyporu, a prędkość ich wypływu będzie większa
- warunek stabilności stanowi, że mieszanka musi być odporna na segregację. Oznacza to zarówno brak sedimentacji ziaren kruszywa w mieszance jak i brak wydzielania się zaczynu. Segregacja w mieszance nie nastąpi, jeśli granica płynięcia mieszanki będzie większa od naprężeń stycznich wywołanych ciężarem ziaren kruszywa. Jeśli osiadanie ziaren kruszywa w mieszance występuje, to jego prędkość będzie wprost proporcjonalna do wielkości ziaren kruszywa i odwrotnie proporcjonalna do lepkości plastycznej.

Jak widać warunki płynności i samoodpowietrzenia są sprzeczne z warunkiem stabilności, a ich pogodzenie sprawia największą trudność przy projektowaniu mieszanki. Im mniejsze są granica płynięcia i lepkość plastyczna, tym łatwiej mieszanka płynie, szybciej się odpowietrza, jednocześnie jednak jest bardziej podatna na segregację. W związku z tym przyjmuje się, że ze względu na warunki płynności i samoodpowietrzenia granica płynięcia mieszanki powinna być jak najmniejsza. Jednocześnie tak się dobiera lepkość plastyczną, aby uzyskać zadowalająco szybkie wypełnienie formy i odpowietrzenie mieszanki przy jak najmniejszej prędkości osiadania ziaren kruszywa.

Oprócz spełnienia warunków reologicznych mieszanka samozagęszczalna musi dodatkowo wykazywać się zdolnością do przepływu przez zbrojenie bez utraty jednorodności, a więc bez zróżnicowania koncentracji ziaren kruszywa po obu stronach warstwy prętów zbrojeniowych na kierunku przepływu mieszanki. Zjawisko to jest nazywane blokowaniem przepływu kruszywa. Jego uniknięcie jest jednak nie tyle zależne od właściwości reologicznych mieszanki, co od przyjęcia ziaren kruszywa o odpowiedniej wielkości. Pomiar parametrów reologicznych mieszanek samozagęszczalnych najlepiej wykonać za pomocą reometru. Jeden z najprostszych przedstawiono na rys. 2. Reometry są jednak kosztowne i wymagają specjalistycz-

Rys. 2. Reometr BT 2



Tablica 1. Zalecane wg [1,7] do badania właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej testy techniczne i ich korelacje z parametrami reologicznymi

Test Norma	Mierzona cecha, jednostka	Klasy konsystencji	Granica płynięcia	Lepkość plastyczna
Rozptyw mieszanki	Rozptyw, mm	SF1 - 500 ÷ 650 mm SF2 - 660 ÷ 750 mm SF3 - 760 ÷ 850 mm	↘	-
	Czas rozptywu do osiągnięcia średnicy 500 mm, s	VS1 - < 2 s VS2 - > 2 s	-	↗
V-funnel	Czas wypływu, s	VF1 - < 8 s VF2 - > 9 ÷ 25 s	-	↗
L-box	Czas wypływu potrzebny mieszance na osiągnięcie odległości 20 i 40 cm od otworu wypływowego, s	3 - 6 s-	-	↗
	Stosunek tamowania - stosunek wysokości przy przeszkodzie z prętów i na końcu skrzynki, -	PA1 - ≥ 0,80 dla 2 prętów PA2 - ≥ 0,80 dla 3 prętów	-	
J-ring	Współczynnik blokowania	PJ1 ≤ 10 mm z 10 prętami PJ2 ≤ 10 mm z 16 prętami	-	-
	Rozptyw, mm	-	↘	-
	Czas rozptywu do osiągnięcia średnicy 500 mm, s	-	-	↘

nej obsługi. Dlatego w praktyce stosuje się następujące, szeroko już rozpowszechnione testy technologiczne: rozptywu mieszanki, V-funnel oraz L-box. Pozwalają one na określenie zdolności do płynięcia mieszanki, lepkości mieszanki oraz zdolności mieszanki do przepływu pomiędzy zbrojeniem. Często stosowanym jest również test J-ring, pozwalający jednocześnie ocenić rozptyw i lepkość mieszanki oraz jej skłonność do blokowania grubego kruszywa. Wszystkie te testy zostały uwzględnione w uzupełnieniu o beton samozagęszczalny normy EN 206 [7]. Szczegółowo zostały omówione np. w [1,2,5]. Korelacje tych testów z parametrami reologicznymi oraz klasy konsystencji dla mieszank samozagęszczalnych przedstawiono w tabl. 1. Zalecane wartości parametrów reologicznych mieszank przy wykonywaniu różnych elementów konstrukcyjnych przedstawiono w tabl. 2 i 3. Mieszanka samozagęszczalna musi również spełniać warunek stabilności, a więc być odporna na segregację. Wg [1,7] odporność mieszanki na segregację bada się testem przesiewu. W badaniu tym wyznacza się w procentach ilość mieszanki przechodzącej przez sito 5 mm w stosunku do całkowitej ilości mieszanki umieszczonej na tym sicie po

Tablica 2. Wymagane parametry reologiczne mieszank samozagęszczalnych wg [1]

Średnica rozptywu (granica płynięcia)			
550 - 650 mm	660 - 750 mm	760 - 850 mm	ponad 850 mm
Elementy nie zbrojone lub słabo zbrojone, elementy pionowe (stupy, ściany) o dużej wysokości betonowane od góry, elementy poziome (płyty) o niewielkich rozmiarach. Utrudnione wykończenie powierzchni elementu.	Formowanie elementów poziomych i pionowych o normalnym zbrojeniu i dowolnych wymiarach	Formowanie elementów poziomych, gęsto zbrojonych, formowanie elementów o skomplikowanych kształtach, pompowanie mieszanki od dołu. Nie zalecane w przypadku elementów pionowych o dużej wysokości, ze względu na duże parcie boczne na deskowania. Kruszywo nie może być większe od 16 mm	Jak w przypadku rozptywu 760 - 850 mm w specjalnych przypadkach. Stosowane kruszywo nie powinno być większe od 12 mm. Duże niebezpieczeństwo segregacji mieszanki.
Czas rozptywu T500 (do średnicy 500 mm) (lepkość plastyczna)			
do 2 s		ponad 2 s	
Czas wypływu mieszanki (V-funnel) (lepkość plastyczna)			
do 8 s		ponad 9 s	
Elementy z gęstym i normalnym zbrojeniem, konieczność wypoziomowania powierzchni i dobre jej wykończenie. Zwiększone niebezpieczeństwo segregacji oraz możliwość zwiększonego parcia na deskowania. Zalecane przy betonowaniu elementów poziomych i pionowych o umiarkowanej wysokości.		Im czas rozptywu większy tym mniejsze parcie mieszanki na deskowania w elementach pionowych oraz większa jej odporność na segregację. Utrudnione dobre wykończenie powierzchni. Możliwe problemy z uzyskaniem ciągłej konstrukcji przy wystąpieniu przerw w betonowaniu. Zalecane w przypadku betonowania elementów pionowych o dużej wysokości.	

Tablica 3. Wymagane właściwości mieszank samozagęszczalnych wg [8]

Lepkość	Płynność Rozptyw mieszanki			Odporność na segregację Zdolność przepływu
VS1 VF1	pochylnie			Sprecyzować zdolność przepływu dla SF1 i SF2
VS 1 lub 2 VF 1 lub 2 lub zadana wartość	ściany stupy	wysokie i smukłe		Sprecyzować zdolność przepływu dla SF3
VS 1 VF1	płyty i stropy			Sprecyzować zdolność przepływu dla SF2 i SF3
	SF 1	SF2	SF3	



Rys. 3. Przykład mieszanki stabilnej VSI 0 i bardzo niestabilnej VSI 3

jej uprzednim przetrzymaniu przez okres 15 minut w przykrytym pojemniku. Jeśli ilość ta jest większa niż 20%, to mieszanka nie jest odporna na segregację. W [9] do oceny stopnia segregacji mieszanki zaleca się stosowanie wskaźnika VSI (Visual Stability Index). Wyróżnia się cztery klasy stabilności (tabl. 4), określane na podstawie wzrokowej oceny wyglądu mieszanki po jej badaniu testem rozplywu. W obu metodach ocena stabilności mieszanki jest zależna od doświadczenia wykonującego badanie, a warunki ich wykonania odbiegają od faktycznie występujących podczas betonowania. W związku z tym przy projektowaniu mieszanki samozagęszczalnej najlepiej określić segregację metodą badania przełomu próbek po ok. 2 dniach dojrzewania.

4. Identyfikacja reologicznych efektów działania superplastyfikatora

Identyfikację reologicznych efektów działania superplastyfikatora wykonuje się w celu:

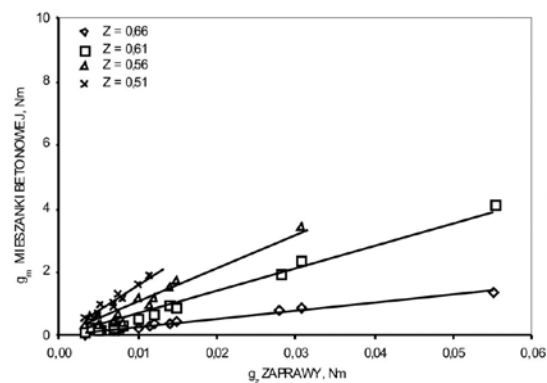
- dobrania optymalnego superplastyfikatora ze względu na kompatybilności z cementem przy uwzględnieniu obecności dodatków mineralnych i domieszek oraz warunków technologicznych wykonywania betonu (temperatura, czas)
- ustalenia wpływu zmian ilości superplastyfikatora na właściwości mieszanki
- ustalenia kierunku i zakresu możliwych zmian właściwości reologicznych mieszanki w wyniku zmian właściwości składników, modyfikacji składu mieszanki oraz zmian warunków wykonania robót betonowych. Zależności te są potrzebne do opracowania wariantów korygowania parametrów reologicznych mieszanki.

Tablica 4. Wskaźnik wizualnej stabilności VSI oceny mieszanek samozagęszczalnych [9]

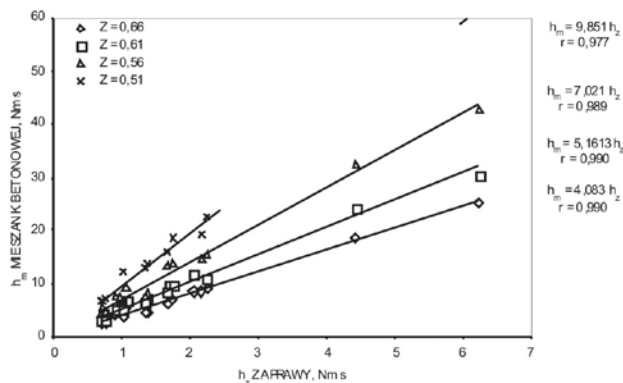
VSI	Ocena mieszanki	Kryteria
0	Bardzo stabilna	Brak oznak segregacji i wycieku zaczynu
1	Stabilna	Brak oznak segregacji, słaby wyciek zaczynu
2	Niestabilna	Mała segregacja, silny wyciek zaczynu, słaby wyciek zaprawy (otoczka do 10 mm)
3	Bardzo niestabilna	Wyraźna segregacja, stos kruszywa w centrum rozplywu, duży wyciek zaprawy (ponad 10 mm), silny wyciek zaczynu

Reologiczną identyfikację efektów działania superplastyfikatora przeprowadza się zawsze doświadczalnie. Ogólne zależności efektów działania superplastyfikatora od czynników technologicznych przedstawione np. w pracy [3-5] mogą być wykorzystane do wstępnego jakościowego doboru składników i jako ogólne wskazania do korygowania właściwości reologicznych. Ze względu na dużą liczbę zmiennych czynników efektywności superplastyfikatora, bardzo przydatne podczas doświadczalnej identyfikacji efektów jego działania są programy badań optymalizacyjnych lub metody powierzchni odpowiedzi. Badania efektów działania superplastyfikatora można wykonywać na zaczynie, lub lepiej na zaprawie o proporcjach składników zgodnych z przewidywanym składem zaprawy w mieszance betonowej. W takim przypadku możliwe jest, przy wykorzystaniu zależności regresyjnych wiążących parametry reologiczne zaprawy i mieszanki betonowej, znaczące zmniejszenie zakresu badań wykonywanych na mieszance i ograniczenie ich do weryfikacji zależności uzyskanych dla zapraw. Zależności pozwalające na prognozowanie zmian parametrów reologicznych mieszanki betonowej na podstawie badania właściwości re-

Rys. 4. Granica płynięcia g_z zaprawy o $P/C = 1,5$, a granica płynięcia g_m mieszanki betonowej z kruszywem 2÷8 mm [10]



Rys. 5. Lepkość plastyczna h_z zaprawy o $P/C = 1,5$, a lepkość plastyczna h_m mieszanki betonowej z kruszywem 2÷8 mm [10].



ologicznych zaprawy wypełniającej stos okruszowy kruszywa w tej mieszance przedstawiono na rys. 4 i 5 [10]. Umożliwiają one optymalizację, kontrolę i korygowanie właściwości reologicznych mieszanki w oparciu o znacznie mniej pracochłonne badania właściwości reologicznych zapraw.

5. Metody projektowania betonów samozagęszczalnych

Obecnie nie ma jednej, powszechnie akceptowanej metody doboru ilości składników betonu samozagęszczalnego. Najczęściej stosowanymi są:

- Metoda japońska [2]. Oparta jest ona na trójetapowym projektowaniu. W etapie pierwszym przyjmowany jest ze względów wytrzymałościowych i trwałościowych stosunek wodno-spoiwowy, ilość cementu i dodatków mineralnych oraz wstępnie ustalana jest ilość superplastyfikatora niezbędna do uzyskania odpowiedniej płynności. Etap ten wykonywany jest na zaczynach. W etapie drugim projektuje się zaprawę o przyjętej wstępnie proporcji objętościowej zaczynu do piasku równej ok. 40%, której wymaganą płynność uzyskuje się poprzez optymalizację ilości superplastyfikatora i/lub ilości zaczynu. Zaprawa powinna się charakteryzować rozptywem od 200 do 280 mm (badanie rozptywu stożkiem do zapraw) i czasem wypływu od 5 do 10 s (V-funnel zapraw). Etap trzeci polega na dodawaniu do zaprojektowanej zaprawy kruszywa grubego, aż do osiągnięcia wymaganych właściwości reologicznych mieszanki. Zaleca się, aby koncentracja objętościowa kruszywa zawierała się w granicach od 0,5 do 0,55, ilość wody nie przekraczała $185 \text{ dm}^3/\text{m}^3$. Korygowanie właściwości reologicznych przeprowadza się za pomocą zmian ilości zaprawy i/lub superplastyfikatora. Metoda ta umożliwia skuteczne i szybkie uzyskanie mieszanki samozagęszczalnej. Charakteryzuje się jednak brakiem kontroli, a tym bardziej możliwości optymalizacji uziarnienia i szczelności stosowanego kruszywa. Powoduje to, że zaprojektowany tą metodą beton zwykle charakteryzuje się dużą ilością zaczynu.
- Metoda szwedzka CBI [2,5]. Oparta jest na dwóch założeniach: doborze szczelnego stosu okruszowego przy zastosowaniu możliwie największej maksymalnej wielkości ziaren kruszywa (ze względu na warunek swobodnego przepływu mieszanki w świetle prętów zbrojenia) oraz zastosowaniu jak najmniejszej ilości zaczynu. Wprowadzono pojęcie „frakcji grubej” kruszywa, definiując ją jako zbiór ziaren kruszywa o średnicy większej od 1/10 przeswitu między prętami zbrojenia konstrukcji. Kruszywo w tej metodzie jest bardzo starannie projektowane, zarówno z warunku maksymalnej szczelności jak i maksymalnej ilości poszczególnych frakcji z warunku niezablokowania przepływu mieszanki. W przeciwieństwie do wymagań stawianych dla kruszywa, autorzy tej metody nie przedstawiają specjalnych wytycznych w stosunku do zaczynu. Stosunek w/s, ilość i rodzaj dodatków mineralnych należy przyjmować z warunków wytrzymałościowego i trwałościowego, ilość frakcji pylastej w cemencie powinna być na poziomie 500-525 kg/m^3 , podkreślona jest również konieczność doboru superplastyfikatora kompatybilnego z cementem. Nie są formułowane zalecenia co do właści-

wości reologicznych zaczynu, korygowanie właściwości mieszanki przeprowadza się poprzez zmiany ilości zaczynu i/lub ilości superplastyfikatora. Metoda ta pozwala na zmniejszenie zużycia zaczynu w porównaniu z metodą japońską, lecz jednocześnie dobór optymalnego uziarnienia kruszywa jest trudny do zrealizowania w warunkach praktycznych, a metoda jest pracochłonna ze względu na konieczność wykonywania dużej liczby prób na mieszance betonowej. Rozwinięciem metody szwedzkiej jest metoda Van i Montgomery'ego [2]. W metodzie tej w sposób analityczny wyznacza się maksymalną objętość kruszywa z uwzględnieniem warunku swobodnego przepływu oraz minimalną objętość zaczynu. Następnie doświadczalnie optymalizuje się wzajemne proporcje udziału kruszywa i zaczynu w celu uzyskania mieszanki samozagęszczalnej. Również tutaj nie uwzględniono wymagań co do właściwości reologicznych zaczynu. Fakt ten powoduje, że zaprojektowane ilości składników należy korygować licznymi testami na mieszance betonowej.

- Metoda KPB. [5,11] Metodę projektowania betonów samozagęszczalnych uwzględniającą wymagania reologiczne i wytrzymałościowe opracowano w Laboratorium Materiałów Budowlanych Katedry Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych Politechniki Śląskiej. W metodzie tej projektowanie betonu sprowadzono do następujących trzech etapów: (i) doboru składu zaczynu ze względu na właściwości reologiczne zaczynu i wytrzymałość betonu; (ii) doboru kruszywa o odpowiednich ze względu na wytrzymałość właściwościach i założonym, zgodnym z zaleceniami uziarnieniu i ostatecznie (iii) doboru stopnia wypełnienia jam niezagęszczanego kruszywa zaczynem stosownie do wymaganych właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej (wyrażonego w postaci dobrze znanego wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem ϕ_{kz}). Skład i składniki zaczynu przyjmuje się w tej metodzie ze względu na właściwości betonu (rodzaj i klasa cementu, rodzaj i ilość dodatków, stosunek w/c) a pożądane jego właściwości uzyskuje się odpowiednio dobierając ilość superplastyfikatora (oraz ewentualnie innych domieszek). Pomiar właściwości reologicznych – średnicy rozptyłu i czasu rozptyłu do średnicy 250 mm – wykonuje się adaptowanym pierścieniem Sotharda do oznaczania konsystencji zaczynów gipsowych. Właściwości reologiczne mieszanek ocenia się testem rozptyłu według [1,7].

W [11] ustalono, że średnica rozptyłu zaczynu odpowiedniego do uzyskania mieszanki samozagęszczalnej powinna wynosić co najmniej 300 mm a czas rozptyłu od 1 do 5 s. Jednocześnie wykazano, że można kształtować właściwości reologiczne mieszanek w pełnym zakresie klas rozptyłu przy stopniu wypełnienia kruszywa zaczynem ϕ_{kz} w przedziale od 1,25 do 1,35. Zależność parametrów reologicznych mieszanki od parametrów reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia kruszywa takim zaczynem ϕ_{kz} opisano zależnościami regresyjnymi pokazanymi na rys. 6 i 7. Zależności te stanowią analityczną podstawę do projektowania właściwości reologicznych mieszanek samozagęszczalnych.

W literaturze można znaleźć wiele innych metod projektowania. Są to zwykle również metody analityczno-doświadczalne, bazujące na metodzie kolejnych przybliżeń. Spośród nich na uwagę zasługują: metoda LCPC opracowana przez Serdana i de Larrarda, metoda IBRI opracowana przez Wallevika i Niellsona oraz metoda UCL opracowana w University College London [2]. Są to jednak metody stosunkowo skomplikowane.

Jak wykazano w [4,5], na parametry reologiczne mieszanki samozagęszczalnej bardzo znacząco wpływa jej temperatura. Wpływ ten jest trudny do uogólnienia, zazwyczaj jednak, nawet niewielkie zmiany temperatury prowadzą do znaczących zmian zdolności mieszanki do płynięcia i samozagęszczenia oraz jej stabilności, utrudniając prawidłowe wykonanie betonu. Chociaż jest to wiedza powszechna, w praktyce projektowania i wykonywania betonów samozagęszczalnych zaskakująco mało uwagi poświęca się temu problemowi. Należy więc podkreślić, że zaroby próbne muszą być wykonywane w takiej temperaturze, jaką się przewiduje w trakcie wykonywania betonowania. Jeśli spodziewane wahania temperatury mogą być większe niż $\pm 5^\circ\text{C}$, należy również opracować i doświadczalnie zweryfikować odpowiednie do warunków warianty składu mieszanki lub sposoby jego korygowania.

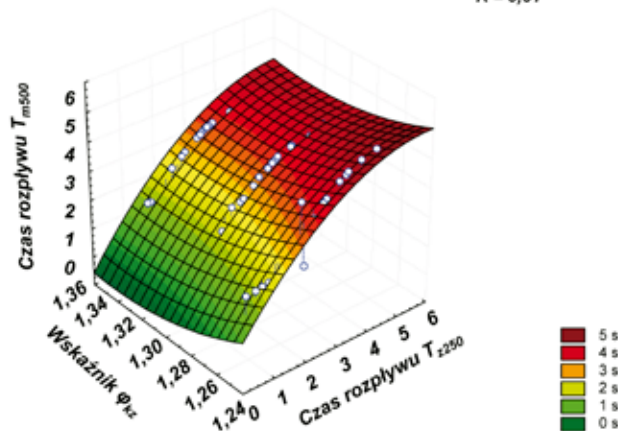
Dobrze zaprojektowana mieszanka samozagęszczalna powinna tolerować drobne zmiany składu i właściwości składników, a zwłaszcza ilości wody i superplastyfikatora. Przy projektowaniu należy sprawdzić, jak właściwości reologiczne mieszanki zmieniają się w wyniku zmiany ilości wody w zakresie $5\text{-}10\text{ dm}^3$ i superplastyfikatora w zakresie $\pm 10\%$ jego ilości. W przypadku dobrze zaprojektowanej mieszanki zmiana ta nie powinna być znacząca (nie powinny się zmieniać klasy rozptywu i lepkości). Podczas projektowania należy zwrócić uwagę na reprezentatywność zarobów próbnych i warunków ich wykonania.

6. Weryfikacja składu mieszanki w wytwórni i na budowie

Składniki próbnego zarobu należy bardzo dokładnie odmierzać, zapewniając przy tym powtarzalność ich właściwości, zwłaszcza niezmienność uziarnienia kruszywa. W związku z tym zaroby próbne nie powinny być mniejsze niż 50 dm^3 . Należy szczególnie podkreślić, że właściwości mieszanki samozagęszczalnej zależą również od intensywności mieszania oraz objętości zarobu. Stąd ważnym jest, aby przy projektowaniu mieszanki stosować mieszalnik jak najbardziej zbliżony do tego, który będzie stosowany przy produkcji mieszanki. Pożądane jest przy tym wykonanie prób technicznych przed rozpoczęciem produkcji betonu samozagęszczalnego w celu wypracowania optymalnej procedury mieszania i potwierdzenia, że projektowany beton spełnia wszystkie wymagania ze względu na właściwości reologiczne mieszanki i właściwości techniczne betonu [12]. Szczególnie ważnym jest, by właściwości, określające jej konsystencję, mieszanka posiadała w czasie betonowania konstrukcji. Specyfika projektowania składu betonu samozagęszczalnego powoduje, że najczęściej występującymi wadami mieszanki jest mniejsza niż wyma-

$$T_{m500} = 227,3598 + 0,463 \cdot \phi_{kz} + 339,199 \cdot T_{z250} - 0,1276 \cdot \phi_{kz}^2 - 0,81 \cdot \phi_{kz} \cdot T_{z250} - 126,1783 \cdot T_{z250}^2$$

$$R = 0,61$$



Rys. 6. Powierzchnia odpowiedzi dla zależności czasu rozptylu mieszanki T_{m500} od czasu rozptylu zaczynu T_{z250} i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem ϕ_{kz} (mieszanka z kruszywem do 16 mm) [11]

gana płynność lub zbyt mała odporność na segregację. W pierwszym przypadku konsekwencją są trudności ze szczelnym wypełnieniem deskowania, w drugim utrata jednorodności betonu w wykonanej konstrukcji.

7. Specyfika składu mieszanki samozagęszczalnej

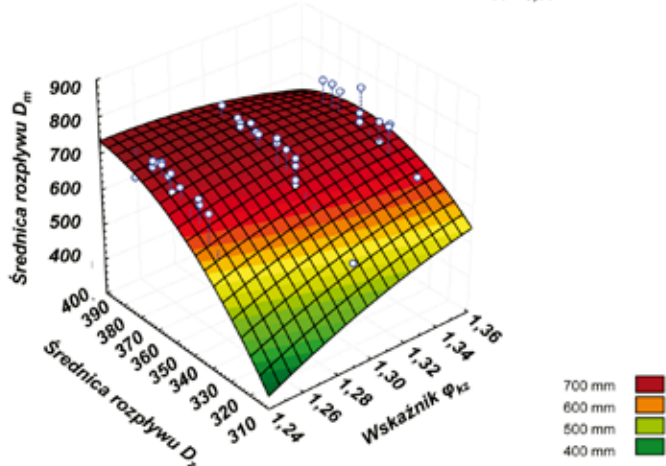
Konieczność spełnienia kryteriów reologicznych determinuje specyficzny skład mieszanki samozagęszczalnej (tabl. 5 i 6). Przede wszystkim przyjmuje się mały stosunek $w/(c+d)$ (w - woda, c - cement, d - dodatki mineralne) oraz dużą ilość frakcji pyłowych ($< 0,125\text{ mm}$). Mały stosunek $w/(c+d)$ i duża ilość frakcji pyłowych ograniczają ilość wody wolnej w mieszance zwiększając jej odporność na segregację i sedimentację. Typowe betony samozagęszczalne charakteryzują się $w/c < 0,50$, $w/(c+d) < 0,35$ oraz zawartością frakcji pyłowych $500\text{--}600\text{ kg/m}^3$. Cementy do mieszanek samozagęszczalnych powinny się charakteryzować możliwie małą wodozadržnością i dobrym współdziałaniem z domieszkami, co ułatwia uzyskanie niskiego stosunku $w/(c+d)$ przy jednocześnie dużej płynności mieszanki.

Do betonów samozagęszczalnych zaleca się stosowanie kruszywa otoczkowego o regularnych kształtach i maksymalnej wielkości ziarnach nieprzekraczającej 20 mm oraz o punkcie piaszkowym $40\text{--}50\%$. Stosowanie kruszywa o mniejszych ziarnach zmniejsza niebezpieczeństwo segregacji mieszanki, a ich regularny kształt ułatwia uzyskanie

Rys. 7. Powierzchnia odpowiedzi dla zależności średnicy rozptylu mieszanki D_m od średnicy rozptylu zaczynu D_z i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem ϕ_{kz} (mieszanka z kruszywem do 16 mm) [11]

$$D_m = -296995,26 + 26815,48 \cdot \phi_{kz} + 68,23 \cdot D_z - 6510,36 \cdot \phi_{kz}^2 - 26,42 \cdot \phi_{kz} \cdot D_z - 0,04 \cdot D_z^2$$

$$R = 0,77$$



Tablica 4. Mediana i rozrzut podstawowych proporcji składników betonów samozagęszczalnych wg [13]

Składnik	Jednostka	Mediana	Percentyl 10%	Percentyl 90%	Wg zaleceń EFNARC	Beton zwykły*
Piasek (< 4 lub 5 mm)	% objętościowo	30,5	29,1	34,8	-	25
	% ilości kruszywa masowo	49,5	44	54	48 - 55	35
Kruszywo (> 4 lub 5 mm)	% objętościowo	31,2	22,9	40	27 - 36	46
Fracje pyłowe < 0,125 mm (razem z cementem i dodatkami)	kg/m ³	500	445	605	380 - 600	335
Zaczyn (woda + fracje pyłowe)	% objętościowo	34,8	32,3	39	30 - 38	29
Woda	kg/m ³	176	161	200	150 - 210	160
Współczynnik woda/fracje pyłowe	objętościowo	1,03	0,83	1,28	-	-
	masowo	0,34	0,28	0,42	-	> 0,45

* - zagęszczanie wibracyjne, wytrzymałość na ściskanie 40 MPa, opad stożka 75 mm

Tablica 5. Mediana i rozrzut podstawowych proporcji składników betonów samozagęszczalnych wg [14]

		Mediana	Percentyl 10%	Percentyl 90%	Wg zaleceń EFNARC	Beton HPC*
Piasek (< 4 lub 5 mm)	% objętościowo	28	27	33	-	25
	% ilości kruszywa masowo	42	38	48	48 - 55	35
Kruszywo (> 4 lub 5 mm)	% objętościowo	34,5	28		27 - 36	40
Fracje pyłowe (< 0,125 mm)	kg/m ³	525	450	640	380 - 600	450 - 550
Zaczyn (woda + fracje pyłowe)	% objętościowo	37	33	45	30 - 38	35
Woda	kg/m ³	170	155	205	150 - 210	120 - 180
Współczynnik woda/fracje pyłowe	objętościowo	-	-	-	-	-
	masowo	0,325	0,26	0,39	-	< 0,40

* - zagęszczanie wibracyjne, wytrzymałość na ściskanie 90 MPa, opad stożka 200 mm

mieszanki o odpowiedniej zdolności do przepływu. Dodatki mineralne zwiększają ilość zaczynu bez potrzeby zwiększania ilości cementu ponad konieczne minimum. Ponieważ ich powierzchnia właściwa jest zwykle wyraźnie większa od cementu, uszczelniają strukturę betonu oraz zmniejszają ilość wody wolnej, co działa stabilizująco na mieszankę. Odpowiednio dobierając rodzaj i ilość dodatków mineralnych można w szerokim zakresie kształtować właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Zwykle do mieszanek samozagęszczalnych stosuje się mączki kamienne (np. zmielony wapień, dolomit), które uważane są za dodatki nieposiadające właściwości wiążących. Gdy chce się uzyskać betony o wyższych klasach i lepszej odporności na oddziaływanie środowiska, stosuje się zmielony granulowany żużel wielkopieczowy, różne popioły lotne oraz gdy wymagane są bardzo duże wytrzymałości – pył krzemionkowy. W przypadku popiołu lotnego kluczowe znaczenie dla reologii mieszanki mają straty prażenia, a więc zawartość węgla w popiele. W badaniach [15] stwierdzono, że straty prażenia na poziomie większym niż 2% powodują wzrost lepkości mieszanki, a na poziomie większym niż 5% również znaczący wzrost granicy płynięcia. Odpowiednią płynność mieszanki samozagęszczalnej uzyskuje się stosując dodatek superplastyfikatora. Dobrze dobrany superplastyfikator powinien zapewniać wymagane właściwości mieszanki przez co najmniej 1-1,5h. Do mieszanek samozagęszczalnych stosuje się superplastyfikatory na bazie polieterów i polikarboksylianów. Ze względu na liczbę czynników determinujących efekty działania superplastyfikatora, jego dobór przeprowadza się doświadczalnie.

Superplastyfikatory nowej generacji zwykle nie zwiększają ilości powietrza w mieszance. Jak pokazują niektóre badania [16], superplastyfikatory te w pewnych przypadkach, zwłaszcza gdy ich

dodatek jest duży, mogą znacząco zwiększać ilość powietrza w mieszance (nawet ponad 5%). Ich obecność może również wpływać na pogorszenie struktury napowietrzenia mieszanki poprzez wzrost wielkości pęcherzyków powietrza i zwiększenie odległości między nimi. Superplastyfikatory stosowane w dużej ilości mogą też znacząco zmieniać czas wiązania cementu (zwykle jest on opóźniony). Efekty te należy brać pod uwagę przy doborze superplastyfikatora. Szczegółowo metody i zasady doboru superplastyfikatorów ze względu na warunki technologiczne, właściwości składników oraz skład mieszanki omówiono np. w [10].

W celu wyeliminowania lub zredukowania segregacji i wycieku zaczynu z mieszanki samozagęszczalnej oraz zmniejszenia jej parcia na deskowania stosuje się domieszki zwiększające lepkość [2,5]. Ze względu na prostotę technologiczną aplikacji stanowią one do pewnego stopnia alternatywę dla stosowania dodatków mineralnych. Umożliwiają bowiem poprawę stabilności mieszanki bez potrzeby ingerowania w jej podstawowy skład. Efekty działania domieszek zwiększających lepkość zależą przede wszystkim od właściwości stosowanego cementu i superplastyfikatora. Należy zwrócić uwagę, że w niektórych przypadkach dodanie domieszek zwiększających lepkość może również wpływać negatywnie na wytrzymałość na ściskanie mieszanki.

Stosowanie domieszek napowietrzających, technologicznie niełatwe w przypadku betonów zwykłych, dodatkowo komplikuje się w przypadku betonów samozagęszczalnych. Po pierwsze, po dodaniu domieszki napowietrzającej zwykle obserwuje się obniżenie granicy płynięcia i lepkości plastycznej mieszanki, co stanowi naturalną konsekwencję zwiększenia objętości zaczynu. W takim przypadku ze względu na niebezpieczeństwo wystąpienia segregacji konieczna jest korekta składu mieszanki poprzez: zmniejszenie dodatku superplastyfikatora

lub zmniejszenie ilości wody. Po drugie, obecność domieszki napowietrzającej może wpływać na obniżenie efektywności działania superplastyfikatora. W takim przypadku konieczne jest zwiększenie dodatku superplastyfikatora lub dobór zestawu domieszek lepiej spełniających wymagania kompatybilności. Dodatkowo zmiany napowietrzenia mieszanki mogą znacząco wpływać na właściwości reologiczne mieszanki w trakcie procesów wykonania betonowania. Jak wspomniano wcześniej, rodzaj superplastyfikatora może wpływać na poziom i strukturę napowietrzenia mieszanki. Dobierając domieszkę upłynniającą i napowietrzającą do betonu samozagęszczalnego należy się więc kierować nie tylko kryteriami reologicznymi, ale również kryterium uzyskania wymaganego stopnia napowietrzenia mieszanki.

Stosowanie innych domieszek (np. opóźniających lub przyspieszających) w betonie samozagęszczalnym odbywa się na ogólnych zasadach. Należy zaznaczyć, że łączne stosowanie kilku domieszek bardzo komplikuje uzyskanie odpowiednich właściwości reologicznych mieszanki oraz ich utrzymanie aż do momentu ułożenia jej w konstrukcji. Możliwy wpływ stosowanych domieszek na efektywność działania superplastyfikatora oraz na właściwości reologiczne mieszanki należy sprawdzać i uwzględnić podczas doboru jakościowego i ilościowego składników.

8. Podsumowanie

Postępowanie przy projektowaniu betonu zwykłego i samozagęszczalnego zasadniczo nie różnią się od siebie. Projektowanie tego drugiego jest jednak bardziej skomplikowane, ze względu na konieczność jednoczesnego spełnienia ostrych warunków urabialności wytrzymałości i trwałości. Wymaga od projektanta znacznie większego zaawansowania technologicznego i dużego doświadczenia oraz jest bardziej pracochłonne i materiałochłonne. Dobór składników i składu prowadzony jest doświadczeniowo i wymaga zwykle wykonania wielu zarobów próbnych. Ze względu na reologiczne podobieństwo zapraw i mieszanek korzystne jest wykonywanie badań na zaczynach, lub lepiej na zaprawach, i dopiero na ostatnim etapie projektowania optymalizowanie składu mieszanki betonowej. Konieczne jest również weryfikowanie urabialności zaprojektowanej mieszanki w warunkach technologicznych wytwórni i budowy.

Jacek Gołaszewski

dr hab. inż., prof. nzw. w Pol. Śl., Politechnika Śląska

Janusz Szwabowski

prof. dr hab. inż., Politechnika Śląska

Literatura

- 1 *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use.* SCC European Project Group, 2005
- 2 G. De Schutter, P.J.M. Bartos, P. Domone, J. Gibbs, *Self compacting concrete.* Dunbeath: Whittles Publishing, 2008
- 3 J. Gołaszewski, *Kształtowanie urabialności mieszanek betonowych superplastyfikatorami.* Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003

TECHNOLOGIA BETONU SAMOZAGĘSZCZALNEGO

Janusz Szwabowski,

Jacek Gołaszewski

Kraków 2010, str. 160,

format B5

oprawa twarda foliowana

cena: 49 zł

Pierwsze na rynku krajowym opracowanie w całości poświęcone jednemu z najnowocześniejszych i coraz szerzej stosowanych materiałów konstrukcyjnych, jakim jest beton samozagęszczalny.

TECHNOLOGIA BETONU SAMOZAGĘSZCZALNEGO

**JANUSZ SZWABOWSKI
JACEK GOŁASZEWSKI**



- 4 J. Szwabowski, *Reologia mieszanek na spoiwach cementowych.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009
- 5 J. Szwabowski, J. Gołaszewski, *Technologia betonu samozagęszczalnego.* Wydawnictwo Polski Cement SPC, Kraków, 2010
- 6 J. Szwabowski, *Reologia mieszanek na spoiwach cementowych.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999
- 7 *FprEN 206-9:2009 Concrete – Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC)*
- 8 J. Walraven, *Structural applications of self compacting concrete Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, RILEM Publications PRO 33, August 2003*
- 9 *ACI 237R-07 – Self-Consolidating Concrete. ACI Committee 237, technical committee document 237R-07, 2007*
- 10 J. Gołaszewski, *Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych w układzie zmiennych czynników technologicznych.* Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006
- 11 J. Szwabowski, J. Gołaszewski, *Właściwości zaczynu i stopień wypełnienia jam kruszywa jako czynniki kształtujące samozagęszczalność i wytrzymałość betonu.* *Cement Wapno Beton*, 2/2010
- 12 J. Śliwiński, R. Czołgosz, *Spostrzeżenia z praktycznego projektowania składu betonów samozagęszczalnych.* *Reologia w technologii betonu.* Ed. J. Szwabowski, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009
- 13 P.L. Domone, *Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies.* *Cement and Concrete Composites*, 28 (2), 2006
- 14 J. Gołaszewski, A. Kostrzanowska, *An overview of case studies about self-compacting high performance concrete.* *International Conference „Concrete and Concrete Structures”, Zylina, Slovakia, 2009*
- 15 M. Urban, *Wpływ wielkości strat prażenia popiołu lotnego krzemionkowego na parametry reologiczne mieszanek nowej generacji.* *„Cement, Wapno, Beton”, 4/2007*
- 16 J. Szwabowski, B. Łaźniewska-Piekarczyk, *Zwiększenie napowietrzenia mieszanki SCC pod wpływem działania superplastyfikatorów karboksylanowych.* *Cement Wapno Beton 4/2008*