

JACEK GOŁASZEWSKI, ALEKSANDRA KOSTRZANOWSKA \*

## WPŁYW WŁAŚCIWOŚCI I ILOŚCI ZACZYNU NA REOLOGIE BETONÓW SAMOZAGĘSZCZALNYCH WYSOKOWARTOŚCIOWYCH

### THE INFLUENCE OF PROPERTIES AND PASTE OF CEMENT CONTENT ON SELF-COMPACTING HIGH PERFORMANCE CONCRETES RHEOLOGY

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono ogólne zależności wpływu właściwości reologicznych zaczynu, wyrażone parametrami: średnicą i czasem rozplywu zaczynu, oraz wpływu ilości zaczynu w mieszance betonowej – wyrażonej poprzez wskaźnik wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$  – na właściwości reologiczne samozagęszczalnych mieszanek betonów wysokowartościowych oraz ich zmiany z upływem czasu.

*Słowa kluczowe: beton samozagęszczalny wysokowartościowy, właściwości reologiczne*

#### Abstract

The influence of rheological properties cement paste's – expressed by parameters: the slump flow value and the time slump flow value as well and the influence of the paste content in concrete mixture – expressed by the ratio of filling the aggregate's crumb pile with paste  $\varphi_{kz}$  on the rheological properties of mixture for self-compacting high performance concrete and its changes with time are presented and discussed in the paper.

*Keywords: self-compacting high performance concrete, rheological properties*

\* Dr hab. inż. Jacek Gołaszewski, prof. P.Śl., mgr inż. Aleksandra Kostrzanowska, Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska.

### Oznaczenia

$D_m$	– średnica rozplywu mieszanki betonowej [cm]
$T_m$	– czas rozplywu mieszanki betonowej [s]
$D_z$	– średnica rozplywu zaczynu cementowego [cm]
$T_z$	– czas rozplywu zaczynu cementowego [s]
$PR_m$	– parametry reologiczne mieszanki: $D_m$ [cm], $T_m$ [s]
$PR_z$	– parametry reologiczne zaczynu: $D_z$ [cm], $T_z$ [s]
$\varphi_{kz}$	– wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem
$R, A, B, AB, AA, BB$	– stałe regresji zależne od właściwości składników

## 1. Wstęp

Najważniejszą cechą betonów samozagęszczalnych (BSZ) są odpowiednie właściwości reologiczne świeżej mieszanki betonowej, przez które rozumie się wysoką płynność oraz lepkość warunkującą stabilność mieszanki, czyli brak segregacji kruszywa i wytrącania się zaczynu. Właściwości reologiczne mieszanki kształtowane są poprzez dobór proporcji składu i staranną selekcję składników. Następnie zostają sprawdzane testami samozagęszczalności przedstawionymi w [1]. Najchętniej stosowane metody optymalizacji składu mieszanki samozagęszczalnej oparte są na próbach doświadczalnych, polegających na kolejnych przybliżeniach składu w celu uzyskania samozagęszczalności mieszanki. W najczęściej stosowanych metodach projektowania betonów samozagęszczalnych algorytm projektowania uwzględnia 3 lub 2 etapy [2–5]. Obecnie nie ma jednej powszechnie akceptowanej metody doboru liczby składników betonu samozagęszczalnego. W najczęściej stosowanych metodach kolejnych przybliżeń określa się z warunku wytrzymałości i trwałości wielkość stosunku  $w/c$  oraz rodzaj stosowanego cementu i dodatków mineralnych, a następnie kolejno ustala się proporcje zaczynu, zaprawy i mieszanki betonowej, aż do chwili spełnienia przez nie odpowiednich wymagań co do właściwości reologicznych. Często pomija się jeden z etapów projektowania, ograniczając je do dwóch kroków: zaprawa–mieszanka (rys. 1) lub zaczyn–mieszanka.

Autorzy prowadzą badania dotyczące metod projektowania betonów samozagęszczalnych wysokowartościowych. Na podstawie wyników badań będzie można uzyskać odpowiedź, która z metod: wg schematu zaczyn–mieszanka, czy schematu zaprawa–mieszanka jest bardziej precyzyjna i użyteczna przy projektowaniu składu mieszanki samozagęszczalnej betonów wysokowartościowych. W artykule przedstawiono zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi zaczynu a właściwościami reologicznymi mieszanki, uwzględniając różną ilość zaczynu w mieszance.

Ta metoda projektowania polega na doborze składu zaczynu ze względu na właściwości reologiczne zaczynu i wytrzymałość betonu, doborze kruszywa o odpowiednich ze względu na wytrzymałość właściwościach i zgodnym z zaleceniami uziarnieniu oraz doborze stopnia wypełnienia jam kruszywa zaczynem, wyrażonego w postaci wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$  (rys. 2) [6–8].



Rys. 1. Schemat projektowania BSZ wg metody japońskiej w schemacie zaprawa–mieszanka [4, 5]

Fig. 1. Outline of designing SCC according to the Japanese method in the scheme mortar–mixture [4, 5]



Rys. 2. Główne czynniki decydujące o właściwościach reologicznych mieszanki wg [6–8]

Fig. 2. The main factors determining the rheological properties of the mixture according to [6–8]

Celem badań przedstawionych w referacie było określenie ogólnych zależności wpływu właściwości reologicznych zaczynu – wyrażonych średnicą i czasem rozplywu zaczynu oraz wpływu ilości zaczynu w mieszance betonowej wyrażonej przez wskaźnik wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$  na właściwości reologiczne samozagęszczalnych mieszanek betonów wysokowartościowych z kruszywa łamanego do  $D_{max} = 16$  mm oraz ich zmiany z upływem czasu. Na podstawie analizy statystycznej otrzymanych wyników badań określono również istotność wpływu badanych czynników materiałowych oraz upływu czasu na właściwości reologiczne zaczynów i mieszanek betonowych.

## 2. Metodyka badania

### 2.1. Czynniki zmienne w badaniach i plan badań

W badaniach określono wpływ właściwości reologicznych zaczynu oraz ilości zaczynu w mieszance betonowej na właściwości reologiczne samozagęszczalnych mieszanek betonów wysokowartościowych. Właściwości reologiczne kształtowano poprzez zmiany składu zaczynu cementowego i mieszanki samozagęszczalnej. Dla zaczynów i mieszanek przyjęto 3 czynniki zmienne na 3 poziomach zmienności (tab. 1). Wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem cementowym  $\varphi_{kz}$  przyjęto na 3 poziomach zmienności w przedziale 1,2–1,4.

Tabela 1

#### Poziomy czynników zmiennych dla badanych zaczynów dla mieszanek samozagęszczalnych

Stosunek <i>w/s</i>			Domieszka superplastyfikatora, SP			Dodatek mineralny – pył krzemionkowy				
			rodzaj	ilość [% m.s.]		rodzaj	ilość [% m.s.]			
0,30	0,34	0,38	SP	2,5	3,0	3,5	CSF	0	5	10

Poziomy czynników dobrano na podstawie analizy danych literaturowych [1, 9, 10], tak aby składy badanych mieszanek odpowiadały zakresem swojej zmienności typowym składom samozagęszczalnych betonów wysokowartościowych stosowanym w praktyce.

W badaniach został zastosowany plan zdeterminowany, selekcyjny, wieloczynnikowy z punktami gwiazdowymi. Taki plan badań umożliwia przeprowadzenie analizy statystycznej istotności wpływu poszczególnych czynników zmiennych w badaniach oraz określenie regresyjnego modelu zależności wpływu parametrów reologicznych zaczynu i stopnia wypełnienia zaczynu kruszywem na parametry reologiczne samozagęszczalnej mieszanki betonu wysokowartościowego.

### 2.2. Właściwości materiałów i skład mieszanek

Właściwości stosowanego w badaniach cementu i pyłu krzemionkowego przedstawiono w tabeli 2. W badaniach stosowano superplastyfikator na bazie polieteru o gęstości  $1,07$  g/cm<sup>3</sup> i stężeniu 32,0%. Superplastyfikator dozowano wagowo, zmieniając ilość wody zarobowej o wodę w nim zawartą. Jako kruszywo zastosowano piasek naturalny 0–2 mm oraz kruszywo łamane sjenitowe o uziarnieniu 2–16 mm. Ilość cementu w mieszankach

zmieniała się w zależności od stosunku  $w/s$  oraz od wskaźnika  $\phi_{kz}$  w przedziale od 487 do 576  $\text{kg/m}^3$ , ilość pyłu krzemionkowego w przedziale od 0 do 62  $\text{kg/m}^3$ , natomiast ilość kruszywa w przedziale od 920 do 1100  $\text{kg/m}^3$ .

Tabela 2

Skład chemiczny zastosowanych składników

Składniki	Skład [%]								Pow. wł. [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	
CEM I 42,5R	21,6	64,4	4,5	2,2	1,25	0,4	3,1	0,91	383
Pył krzemionkowy	92,8	0,7	0,6	0,3	1,32	0,3	0,8	0,5	18000

### 2.3. Metoda pomiaru parametrów reologicznych zaczynów i mieszanek

Pomimo braku przepisów normowych dotyczących betonów samozagęszczonych udało się opracować wiele metod oceny urabialności (właściwości reologicznych), rozumianej jako płynność i zdolność mieszanki do samopoziomowania oraz przepływu między prętami zbrojenia, niezależnie od jego ułożenia. Metody te szczegółowo zostały przedstawione w [1]. Najczęściej zdolność do płynięcia i lepkość mieszanki bada się testem rozplwy.

Właściwości reologiczne mieszanek oceniono ww. testem rozplwy mieszanki uformowanej w kształcie stożka Abramsa. W teście mierzy się czas rozplwy do 50 cm ( $T_m$ ) oraz wartość maksymalnej średnicy rozplwy ( $D_m$ ). Test dostarcza również pewnych informacji dotyczących ewentualnej segregacji, którą ocenia się wizualnie.

Mieszanki przygotowano w mieszalniku o działaniu wymuszonym. Czas mieszania wynosił 5 min, najpierw przez 1 min mieszano suche składniki, a następnie dodawano wodę wraz z superplastyfikatorem. Pomiar parametrów reologicznych wykonywano po 20 i 60 minutach od zakończenia mieszania składników. Pomiędzy pomiarami mieszankę przechowywano w mieszalniku pod przykryciem. Przed drugim pomiarem mieszankę mieszano przez 3 min. Temperatura podczas badań utrzymywała się na stałym poziomie  $20^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ .

Właściwości reologiczne zaczynu również zmierzono testem rozplwy. Test ten jest technologiczną charakterystyką podatności na płynięcie zaczynu. Wykonuje się go na stalowej płycie pomiarowej o wymiarach  $70 \times 70$  cm, na której współosiowo oznaczone zostały okręgi: o średnicy 25 cm jako średnica pomiaru czasu rozplwy zaczynu ( $T_2$ ) oraz o średnicy 5 cm, pozwalającej na centralne ułożenie pierścienia takiego samego jak do oznaczenia konsystencji zaczynów gipsowych – pierścienia Sotharda (fot. 1).

Zaczyny do badań przygotowywano w mieszalniku do zapraw normowych. Czas mieszania wynosił 3 min przy prędkości obrotowej mieszadła równej 140 obr/min. Pomiar parametrów reologicznych w przeprowadzono po 20 i 60 min od zakończenia mieszania. Pomiędzy pomiarami zaczyn przechowywano pod przykryciem i mieszano przez 1 min bezpośrednio przed rozpoczęciem następnego pomiaru. Temperatura podczas badań utrzymywała się na stałym poziomie  $20^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ .



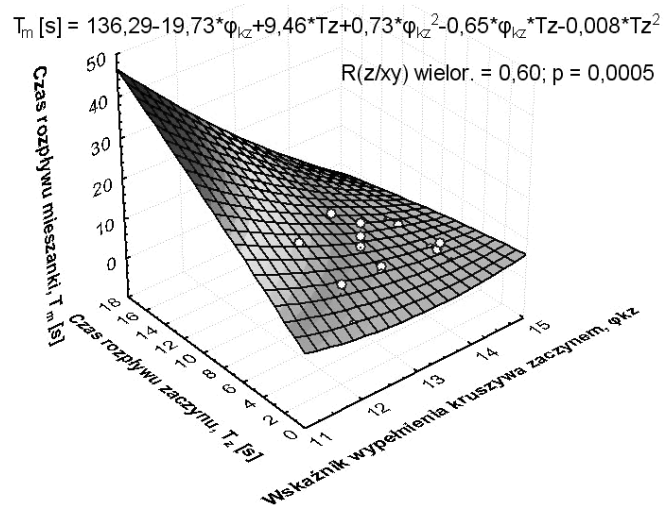
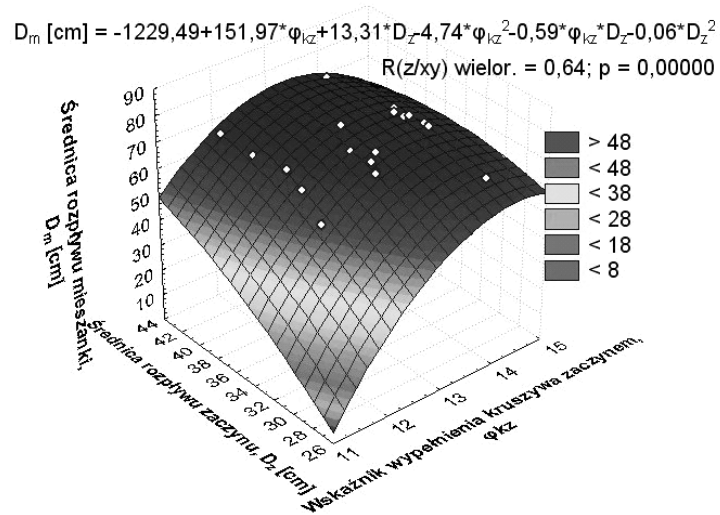
Fot. 1. Płyta do rozplywu zaczynu  
Photo 1. Slab for slump flow of cement paste

### 3. Wyniki badań i dyskusja

Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 3 i 4. W ramach analizy wyników badań określono następujące funkcje regresyjne:

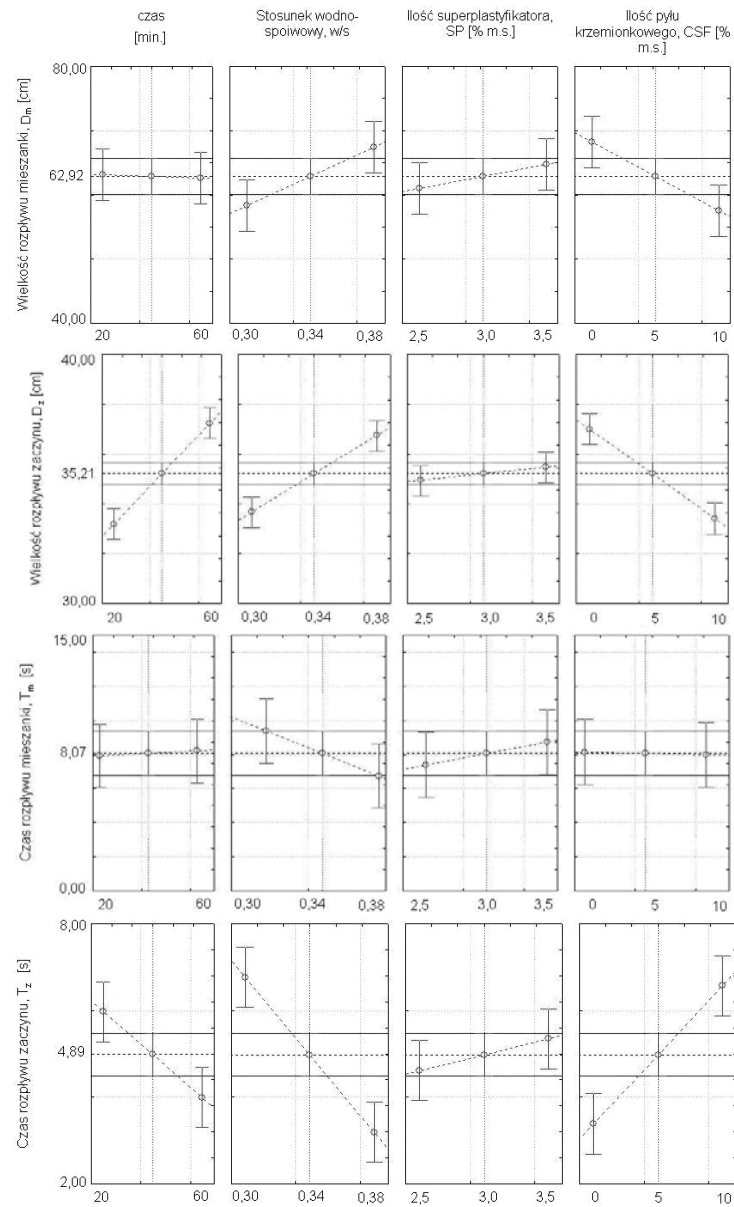
- 1) wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$   $\rightarrow$  średnica rozplywu zaczynu  $D_z$   $\rightarrow$  średnica rozplywu mieszanki  $D_m$ ;
- 2) wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$   $\rightarrow$  czas rozplywu zaczynu  $T_z$   $\rightarrow$  czas rozplywu mieszanki  $T_m$ .

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy powierzchniowe zależności parametrów reologicznych (średnicy oraz czasu rozplywu) samozagęszczalnej mieszanki betonu wysokowartościowego od parametrów reologicznych (średnicy oraz czasu rozplywu) zaczynu i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$ . Zależności wykazują, że w miarę zwiększania się rozplywu zaczynu i zwiększania wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$ , zwiększa się średnica rozplywu mieszanki betonowej. W miarę zmniejszania się czasu rozplywu zaczynu i zwiększania wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$ , zmniejsza się czas rozplywu mieszanki betonowej.



Rys. 3. Wykres powierzchniowy zależności: wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$  – parametr reologiczny zaczynu  $D_z$ ,  $T_z \rightarrow$  parametr reologiczny mieszanki  $D_m$ ,  $T_m$

Fig. 3. Surface dependence graph: the ratio of filling the aggregate's crumb pile with paste  $\varphi_{kz}$  – rheological parameter of cement paste  $D_z$ ,  $T_z \rightarrow$  rheological parameter of concrete mixture  $D_m$ ,  $T_m$



Rys. 4. Profile wartości aproksymowanych parametrów reologicznych zaczynu i mieszanki samozagęszczalnej dla betonu samozagęszczalnego wysokowartościowego

Fig. 4. Profiles of the value approximate of rheological parameters of paste and mixture for self compacting high performance concrete



Regresyjną funkcję zależności parametrów reologicznych samozagęszczalnej mieszanki betonu wysokowartościowego od parametrów reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem  $\varphi_{kz}$  można sformułować w postaci wielomianu drugiego stopnia w postaci

$$PR_m(\varphi_{kz}, PR_z) = R + A \varphi_{kz} + B PR_z + AB \varphi_{kz} PR_z + AA \varphi_{kz}^2 + BB PR_z^2 \quad (1)$$

gdzie:

- $PR_m$  – parametry reologiczne mieszanki:  $D_m$  [cm],  $T_m$  [s],
- $PR_z$  – parametry reologiczne zaczynu:  $D_z$  [cm],  $T_z$  [s],
- $\varphi_{kz}$  – wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem,
- $R, A, B, AB, AA, BB$  – stałe regresji zależne od właściwości składników.

Współczynniki korelacji wielokrotnej dla tak przyjętego modelu pokazano na rys. 4. Równanie to charakteryzuje się dosyć wysokimi estymatorami dopasowania i istotności. Parametry średnicy rozplywu bądź czasu rozplywu mieszanki obliczone na podstawie równania zmierzonego doświadczalnie zostały zweryfikowane w badaniach kontrolnych. Średnie odchylenie zmierzonych wartości średnicy oraz czasu rozplywu mieszanki od obliczonych kształtuje się na poziomie około 20%, przy czym maksymalne odchylenie nie przekracza 40%. Szeroki zakres przestrzeni czynnikowej, dla której określono równanie regresyjne, oraz zadowalająca zgodność parametrów reologicznych mieszanki, obliczonych na podstawie równania regresyjnego i zmierzonego doświadczalnie, stanowią o możliwości skutecznego jego stosowania do przewidywania właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej.

W oparciu o analizę wariancyjną otrzymanych wyników badań określono istotność wpływu badanych czynników materiałowych na właściwości reologiczne zaczynów i mieszanek betonowych. Właściwości reologiczne zaczynu zależą przede wszystkim od stosunku  $w/s$  i dodatku pyłu krzemionkowego oraz w następnej kolejności upływu czasu. W badanym przedziale efekt zwiększania ilości superplastyfikatora jest wyraźnie słabszy. Zgodnie z oczekiwaniami zwiększenie stosunku  $w/s$  lub dodatku superplastyfikatora bądź zmniejszenie ilości dodatku pyłu krzemionkowego powoduje zwiększenie rozplywu oraz jednocześnie zmniejszenie czasu rozplywu zaczynu cementowego (rys. 5). Właściwości reologiczne zaczynu zmieniają się z upływem czasu – średnica rozplywu rośnie, a czas rozplywu maleje (rys. 5).

Właściwości reologiczne mieszanki betonowej zależą kolejno od stosunku  $w/s$ , dodatku pyłu krzemionkowego oraz domieszki superplastyfikatora. Ogólnie, zgodnie z oczekiwaniami, zwiększenie stosunku  $w/s$  lub dodatku superplastyfikatora bądź zmniejszenie ilości dodatku pyłu krzemionkowego powoduje zwiększenie rozplywu i jednocześnie zmniejszenie czasu rozplywu mieszanki (rys. 5). Właściwości reologiczne mieszanki zmieniają się z upływem czasu – średnica rozplywu maleje, a czas rozplywu rośnie (rys. 5). Odwrotnie niż zmiana właściwości reologicznych zaczynu z upływem czasu. Efekt ten jest tym mniejszy im większy jest stosunek  $w/s$ . Zakres zmian czasu rozplywu w czasie maleje również ze wzrostem  $w/s$  i dodatku superplastyfikatora oraz przy zmniejszeniu ilości dodatku pyłu krzemionkowego.

#### 4. Podsumowanie

Właściwości reologiczne i samozagęszczalność betonów wysokowartościowych zależą od właściwości reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem  $\phi_{kz}$ . Stopień zależności kształtuje się na dość wysokim poziomie istotności. Na podstawie pomiaru parametrów reologicznych zaczynu można przewidywać właściwości reologiczne mieszanki.

Przyjęty model regresyjny (1) dobrze opisuje zależność parametrów reologicznych samozagęszczalnych mieszanek betonów wysokowartościowych od parametrów reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem  $\phi_{kz}$ . Może on być, po uprzednim skorygowaniu współczynników regresji dla stosowanych składników, wykorzystywany do przewidywania i kształtowania właściwości reologicznych samozagęszczalnej mieszanki betonowej.

Stwierdzono, że ze względu na skład na właściwości reologiczne mieszanki największy wpływ ma stosunek  $w/s$ , a następnie zawartość pyłu krzemionkowego. Jednocześnie zauważono, że wpływ wielkości dodatku superplastyfikatora na właściwości reologiczne mieszanki w badanym zakresie zmienności jest mniej istotny statystycznie. Na właściwości reologiczne zaczynu największy wpływ ma kolejno stosunek  $w/s$ , zawartość pyłu krzemionkowego oraz ilość superplastyfikatora.

Na właściwości reologiczne zaczynów cementowych czas wpływa inaczej niż na mieszanki samozagęszczalne. Wraz z upływem czasu średnica rozplywu mieszanki zmniejsza się, a czas rozplywu się wydłuża. Natomiast średnica rozplywu zaczynu rośnie, a czas rozplywu maleje z upływem czasu. Projektując mieszanki samozagęszczalne na podstawie parametrów reologicznych zaczynów, należy mieć na uwadze to zjawisko.

O samozagęszczalności mieszanki decyduje przede wszystkim parametr średnicy rozplywu zaczynu ( $D_2$ ). Na podstawie wyników badań określono zakres zmienności parametrów reologicznych zaczynów ze względu na możliwość uzyskania betonów samozagęszczalnych. Zaczyny do betonów samozagęszczalnych wysokowartościowych powinny się charakteryzować średnicą rozplywu ponad 320 mm. Uzyskane czasy rozplywu w granicach od 1 do 10 s są znacząco większe niż w przypadku zaczynów do betonów zwykłych (1–5s) i umożliwiają uzyskanie mieszanek o czasie rozplywu wyraźnie ponad 2 s, co kwalifikuje je do klasy lepkości VS 2. Te zakresy parametrów reologicznych zaczynów (średnicy i czasu rozplywu zaczynu), typowych dla mieszanek samozagęszczalnych dla betonów wysokowartościowych mogą być wykorzystane przy projektowaniu i korygowaniu urabialności betonów samozagęszczalnych wysokowartościowych.

#### Literatura

- [1] EFNARC, *The European Guidelines For Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use*, May 2005.
- [2] Domone P.L., Chai H.-W., *Design and testing of SCC. In: Production Methods and Workability of Concrete*, E & FN Spon. 1996, 223-236.
- [3] Edamatsu Y., Nishida N., Ouchi M., *A rational mix-design for SCC considering interaction between coarse aggregate and mortar particles*, 1st Int. RI-

- LEM Symp. on SCC, Stockholm, Sep. 13-14 1999, ed. RILEM Publ. S.A.R.L., 309-319.
- [4] Okamura H., Oza wa K., *Mix design method for self-compacting concrete*, Concrete Library of Japan Society of Civil Engineers, No 25, June 1995, 107-120.
- [5] Li Z., *State of workability design technology for fresh concrete in Japan*, Cement and Concrete Research, 37 (9), 2007, 1308-1320.
- [6] Czopowski E., *Wskaźnik reologiczny zaczynu w projektowaniu samozagęszczalności betonów*, Reologia w technologii betonu, red. Szwabowski J., Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009, s. 167-178.
- [7] Czopowski E., *Wskaźnik reologiczny zaczynu w projektowaniu samozagęszczalności betonów*, VII Sympozjum Naukowo-Techniczne Reologia w Technologii Betonu, Gliwice, 2005.
- [8] Czopowski E., *Formuła kompozytowa betonu podstawą koncepcji projektowania betonów samozagęszczalnych*, Konferencja Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność, Wisła 2006, Stowarzyszenie Producentów Cementu i Wapna, Kraków 2006, s. 67-80.
- [9] Yin J., Xie Y., Yu Z., *Optimization of the fabrication technology of self-compacting high performance concrete*, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating SCC'2005-China, 26-28 May 2005.
- [10] De Schutter G., Bartos P., Domone P., Gibbs J., *Self-Compacting Concrete*, Whittles Publishing, Caithness 2008.