

Wpływ łącznego dodatku mikrokrzemionki zagęszczonej i krzemionkowych popiołów lotnych na wielkość uszkodzeń w warstwie stykowej kruszywo-zaczyn

Mgr inż. Damian Marek Gil, dr hab. inż. Grzegorz Ludwik Golewski, prof. PL, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska

1. Wprowadzenie

Od wielu lat beton jest głównym materiałem konstrukcyjnym wykorzystywanym, w ogromnych ilościach, w budownictwie na całym świecie, np. [1, 2]. Ze względu na swoją heterogeniczność zaliczany jest do grupy kompozytów zbudowanych z kruchej matrycy cementowej, sztywnych inkluzji w postaci kruszywa oraz warstw stykowych występujących na granicy obu podstawowych komponentów. Budynki i budowle inżynierskie, wykonane z betonu, często mają skomplikowane konstrukcje pracujące w bardzo trudnych i różnorodnych warunkach. Z tych względów wymagają zapewnienia wysokiej trwałości i niezawodności pracy [3]. Jednym z nowoczesnych rozwiązań, które byłoby w stanie sprostać tym zadaniom, jest polepszanie parametrów i właściwości materiałów budowlanych, dzięki wykorzystaniu założeń inżynierii materiałowej. Ta dyscyplina nauki pełni obecnie ważną funkcję w budownictwie, a jej postulaty, w odniesieniu do kompozytów betonów, wykorzystywane są np. przy rozwoju nowych i innowacyjnych odmian tych materiałów w oparciu o ich strukturalną modyfikację [4]. Kompozyt, na bazie spoiwa cementowego, może być modyfikowany zarówno przed stwardnieniem, jak i w późniejszym okresie jego dojrzewania [5]. Na etapie projektowania składu mieszanki betonowej można wykorzystać odpowiedni rodzaj oraz skład ziarnowy kruszywa [6], zastosować dodatki mineralne, dobrać odpowiednie domieszki chemiczne lub zaproponować zastąpienie cementu matrycą żywiczną – polimerobetonem [7–9].

Modyfikacja kompozytów cementowych dodatkami mineralnymi, w postaci krzemionkowych popiołów lotnych (FA) lub mikrokrzemionki (SF), pozwala na utylizację odpadów poprodukcyjnych, które wytwarzane są w bardzo dużych ilościach [10]. Zabiegi takie pozwalają również zmniejszyć zużycie cementu w składzie mieszanki betonowej. Ograniczenie cementu do produkcji betonu daje wiele korzyści, z których najważniejszymi są redukcja emisji szkodliwych gazów i pyłów do atmosfery oraz zmniejszenie degradacji środowiska naturalnego poprzez ograniczenie wydobywania składników do produkcji klinkieru [11]. Wykorzystanie

dodatków mineralnych powoduje zmiany w mikrostrukturze betonu. Efektem tego może być m.in. polepszenie parametrów wytrzymałościowych betonu bądź zwiększenie jego trwałości [12, 13].

Biorąc powyższe pod uwagę, w pracy przedstawiono analizy dotyczące wpływu dodatku FA oraz SF na wielkość mikrorys występujących w warstwie stykowej kruszywa grubego z zaczynem cementowym (Interfacial Transition Zone – ITZ). We wcześniejszych pracach, z tego zakresu tematycznego, autorzy wykazali, że dodatek krzemionkowych popiołów lotnych [14] oraz wapiennych popiołów lotnych [15] przyspiesza proces zarastania rys, a zwłaszcza mikrorys. Ponadto, w przypadku betonów z dodatkami mineralnymi, duży wpływ na uzyskiwane rezultaty charakterystyk makroskopowych, m.in. wytrzymałości na ściskanie, ma wiek betonu w chwili przeprowadzenia badań [16].

Ocenę skuteczności modyfikacji struktury betonu dwoma dodatkami mineralnymi przeprowadzono zatem w oparciu o wyniki z badań mikrostrukturalnych, ze zwróceniem uwagi na czas dojrzewania kompozytów. W trakcie analiz mikroskopowych oceniano szerokość pęknięć występujących w obszarze ITZ kruszywa grubego. Należy zwrócić uwagę, że eksperymenty w obszarze ITZ – która jest najsłabszą fazą w betonie, np. [17–21] – mogą stanowić źródło cennych informacji o skuteczności zastosowania FA i SF jako aktywnych modyfikatorów struktury matrycy.

2. Podstawowe cechy dodatków mineralnych zastosowanych w badaniach

Skład chemiczny obu dodatków został oznaczony metodą spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej XRF. Krzemionkowy popiół lotny (rys. 1) zawierał głównie krzemionkę (SiO_2) oraz tlenki glinu (Al_2O_3) i żelaza (Fe_2O_3), natomiast dominującym składnikiem mikrokrzemionki zagęszczonej był tlenek krzemu (SiO_2). Wagowy skład chemiczny, wykorzystanych w badaniach dodatków mineralnych zestawiono w tabelach 1 i 2. Próbkę dodatków pucolanowych poddano obserwacji pod skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM). Przykładowe zdjęcie przedstawiające morfologię ziaren

Tabela 1. Skład chemiczny popiołów lotnych

Składnik	Zawartość [% wagowo]
SiO ₂	55,27
Al ₂ O ₃	26,72
Fe ₂ O ₃	6,66
K ₂ O	3,01
SO ₃	0,47
MgO	0,81
CaO	2,35
P ₂ O ₅	1,92
Ag ₂ O	0,10
BaO	0,10
TiO ₂	1,89
SrO	0,22
LOI*	4,66
Suma:	99,52
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ = 88,65 % ≥ 70,00 %	

LOI* strata prażenia

Tabela 2. Skład chemiczny mikrokrzemionki zagęszczonej

Składnik	Zawartość [% wagowo]
SiO ₂	91,90
Al ₂ O ₃	0,71
Fe ₂ O ₃	2,54
K ₂ O	1,53
SO ₃	0,45
MgO	1,14
CaO	0,31
P ₂ O ₅	0,63
Cl	0,28
Ag ₂ O	0,07
TiO ₂	0,01
MnO	0,26
LOI*	3,83
Suma:	99,83
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ = 95,15 % ≥ 70,00 %	

LOI* strata prażenia

krzemionkowych popiołów lotnych oraz mikrokrzemionki zagęszczonej przedstawiono na rysunku 1.

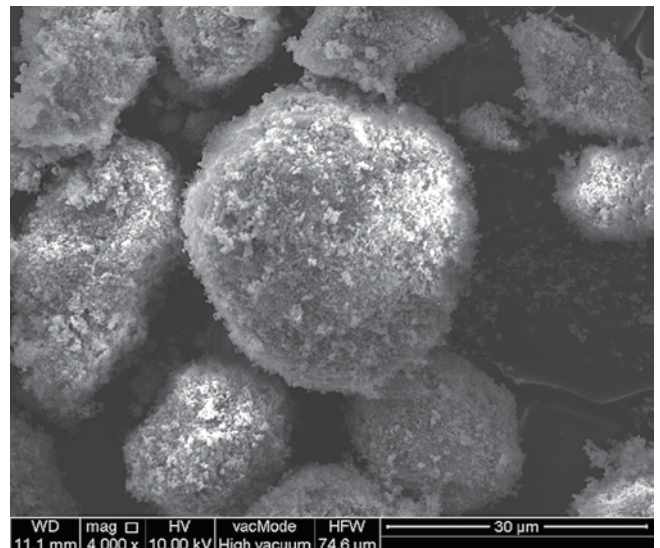
Dyfraktogram analizowanego materiału pokazuje, że w jego składzie fazowym występuje szkło oraz trzy składniki kryształiczne: kwarc, mulit i hematyt (rys. 2).

Na podstawie przeprowadzonej analizy rentgenograficznej można stwierdzić, że w składzie fazowym mikrokrzemionki zagęszczonej szczególnie wyróżnia się duża zawartość szkła (rys. 3). Taki obraz składu fazowego mikrokrzemionki świadczyć może o jej drobnym uziarnieniu oraz wysokiej aktywności pucolanowej.

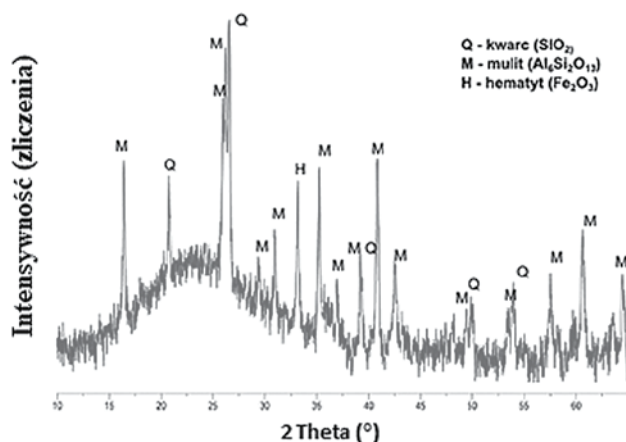
3. Analiza mikrostrukturalna betonu z różną kompozycją dodatków

3.1. Materiały wykorzystane w badaniach

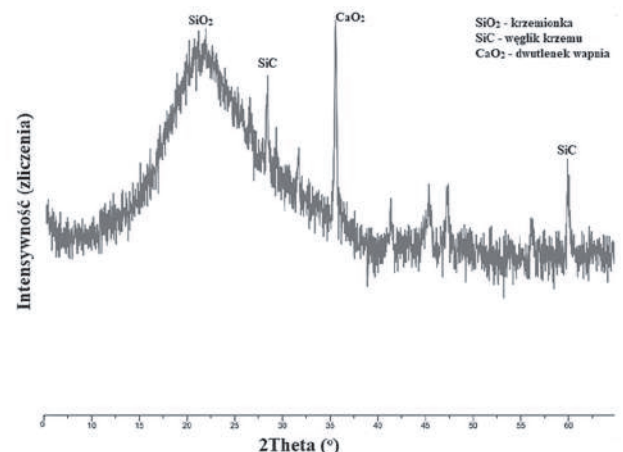
Analizy przeprowadzono na próbkach przygotowanych z betonu o różnej kompozycji dodatków mineralnych. Wykonano następujące rodzaje próbek: referencyjne, ze stałym dodatkiem mikrokrzemionki zagęszczonej i ze zmienną ilością



Rys. 1. Zdjęcia SEM krzemionkowego popiołu lotnego (po lewej) oraz mikrokrzemionki zagęszczonej (po prawej), wykonane przy powiększeniu 4000 x



Rys. 2. Dyfraktogram krzemionkowych popiołów lotnych



Rys. 3. Dyfraktogram mikrokrzemionki zagęszczonej

Tabela 3. Oznaczenia serii betonu

Oznaczenie receptury	Ilość cementu [% wagowo]	Ilość i rodzaj dodatku [% wagowo]
FA00+SF00	100% CEM I 32,5 R	0%
FA00+SF10	90% CEM I 32,5 R	10% SF
FA10+SF10	80% CEM I 32,5 R	10% FA 10 % SF
FA20+SF10	70% CEM I 32,5 R	20% FA 10 % SF

krzemionkowych popiołów lotnych. Oznaczenia poszczególnych serii betonu podano w tabeli 3.

Ilość pozostałych składników była stała we wszystkich kompozytach. Do wykonania mieszanek betonowych wykorzystano: kruszywo żwirowe o uziarnieniu do 8 mm, piasek do 2 mm, CEM I 32,5 R, wodę z wodociągu miejskiego oraz superplastyfikator. Dokładne ilości tych materiałów, wykorzystane do wykonania każdej serii betonu, przedstawiono w [7].

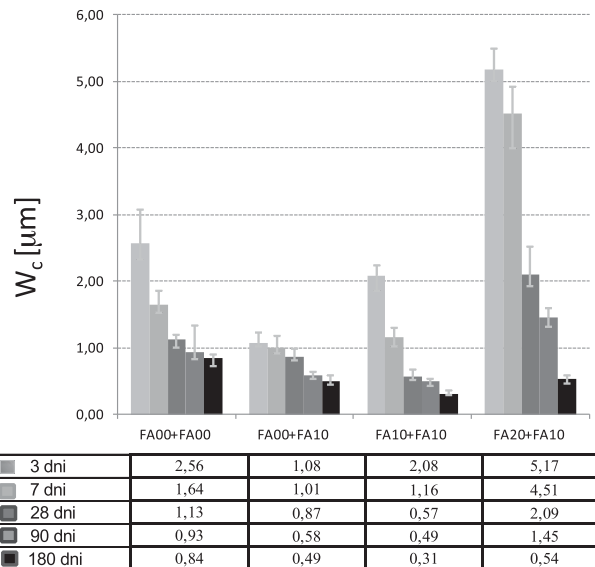
3.2. Analiza mikrostruktury betonu w ITZ

Analizę mikrostruktury betonu można przeprowadzić za pomocą urządzeń, takich jak skaningowy mikroskop elektronowy, mikroskop optyczny czy metodą tomografii komputerowej. W przypadku oceny wielkości mikro- oraz submikrorys najdokładniejszą metodą jest SEM. Przy odpowiedniej liczbie pomiarów na próbkach możliwe jest określenie średnich szerokości rozwarcia mikrorys (*Width of cracks* – W_c) pomiędzy kruszywem grubym a matrycą cementową.

Wyniki badań własnych wraz z wykresem obrazującym różnice wynikające z rodzaju oraz wieku badanych kompozytów o różnej kompozycji dodatków mineralnych przedstawiono na rysunku 4. Wybrane, przykładowe, reprezentatywne zdjęcia SEM, wykonane dla analizowanych kompozytów przedstawiono na rysunku 5.

Na podstawie analizy rozkładów średnich wartości W_c widać wyraźnie, że największe rozwarcia mikrorys występują w betonie z największą ilością dodatków pucolanowych w najkrótszym okresie dojrzewania betonu. Po 3 dniach wielkość W_c dla tego materiału, wynosi 5,17 μm , co stanowi od ponad 2 \times do niespełna 5 \times większą wartość w stosunku do wyniku uzyskanego dla pozostałych kompozytów. W młodym wieku pęknięcia o największych szerokościach występowały w betonach z dodatkami mineralnymi. W FA20+SF10 miały one formę dużych uskoków występujących przy granicy z ziarnami kruszywa (rys. 5b). W miarę postępującego procesu dojrzewania wielkości uszkodzeń we wszystkich kompozytach ulegały zmniejszeniu, a ich struktura, widoczna w obrazach SEM, była bardziej homogeniczna, co jest potwierdzeniem wniosków z badań przedstawionych w pracach [14, 16, 22].

Po 28 dniach dojrzewania i w kolejnych badaniach najniższe wartości W_c odnotowano dla betonu z 20% kompozycją dodatków mineralnych. Ulegały one sukcesywnemu zmniejszeniu od wartości 0,57 μm dla betonu badanego po 4 tygodniach do poziomu 0,31 μm w przypadku kompozytu półrocznego.

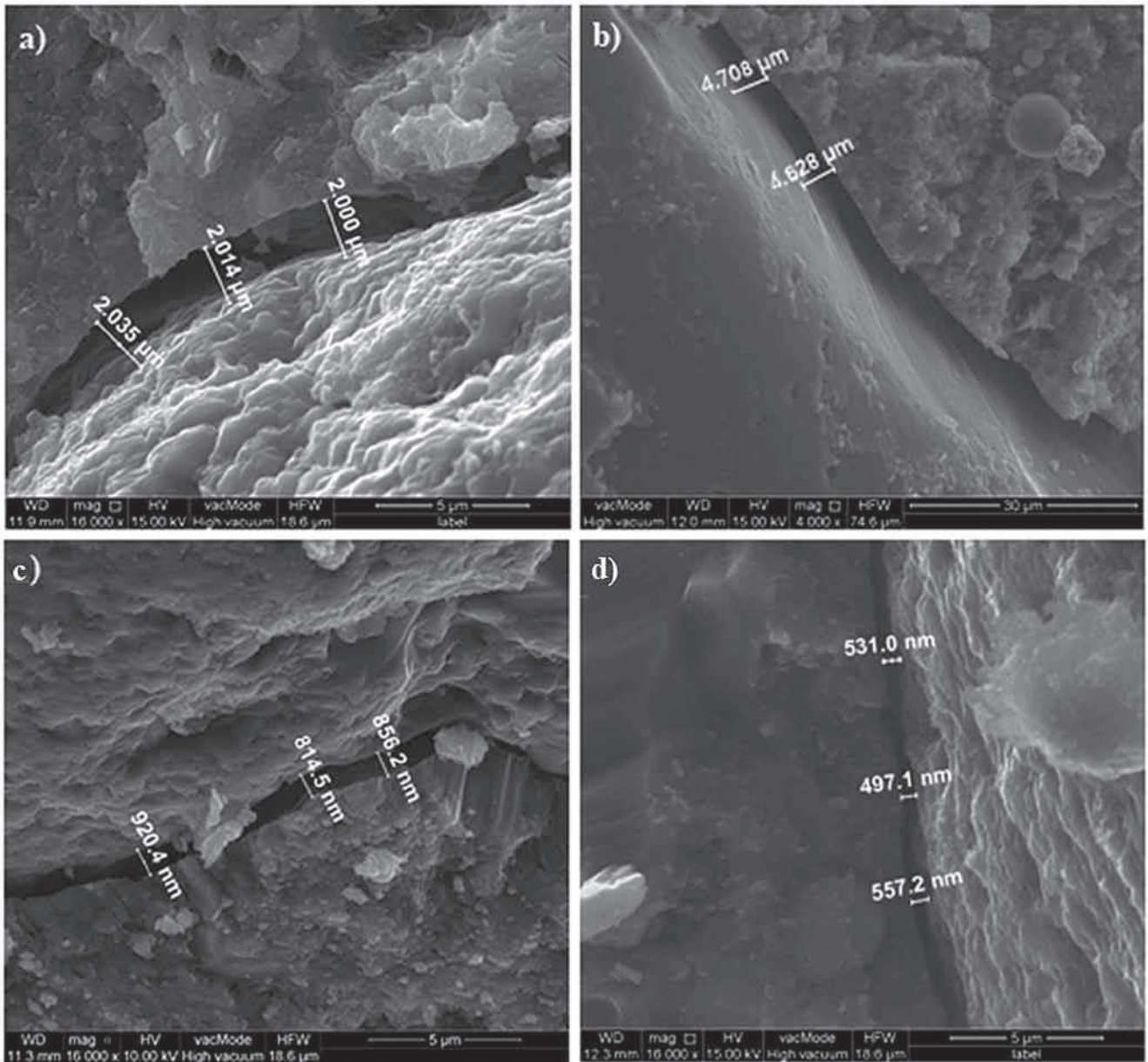
**Rys. 4.** Średnie szerokości pęknięć W_c w ITZ kompozytów betonowych

We wszystkich okresach czasowych największe szerokości pęknięć zaobserwowano dla betonu FA20+SF10. Mimo to analizując względne zmiany W_c na przestrzeni roku, należy zwrócić uwagę, że relatywnie najintensywniejsza homogenizacja struktury betonów wystąpiła w przypadku właśnie tego materiału.

W najpóźniejszym okresie oceny uszkodzeń w próbkach zaobserwowano, że dodatki mineralne zastosowane do betonu obniżają szerokość rozwarcia mikrorys w ITZ pomiędzy kruszywem grubym a zaczynem. W okresie od 3 do 180 dni jest widoczne wyraźne uszczelnianie struktury wszystkich z analizowanych kompozytów.

4. Podsumowanie

Dodatek FA oraz SF do betonu modyfikuje mikrostrukturę matrycy cementowej oraz ITZ w obszarze kruszywa grubego. Dodatek mikrokrzemionki zagęszczonej pozwala na uszczelnienie struktury materiału oraz zmniejszenie wielkości mikrorys w stosunku do betonu zawierającego jedynie dodatek popiołów lotnych [14, 22]. Istotny wpływ na uzyskiwane wyniki doświadcza, w betonach z dodatkiem FA oraz SF, ma czas dojrzewania kompozytów. Beton z dodatkiem jedynie mikrokrzemionki charakteryzuje się najmniejszą szerokością rozwarcia mikrorys do 28 dnia dojrzewania. Dodatek krzemionkowych popiołów lotnych spowodował w młodym wieku spowolnienie zarastania mikrorys w betonie. Dopiero po 90 dniach beton FA10+SF10 wykazał się mniejszą szerokością rozwarcia mikrorys w stosunku do pozostałych kompozytów. Największe uszkodzenia w strefie przejściowej zaobserwowano w betonie z największą ilością dodatków – FA20+SF10. Materiał ten wyróżniał się jednak najszybszym tempem usztywniania tej strefy betonu w odróżnieniu od innych betonów. Wskazuje to na wysoką



Rys. 5. Szerokość rozwarcia mikrorysy: a) próbka FA10+SF10 po 3 dniach dojrzewania, b) próbka FA20+SF10 po 7 dniach dojrzewania, c) próbka FA00+SF10 po 28 dniach dojrzewania, d) próbka FA20+SF10 po 180 dniach dojrzewania

aktywność dodatków pucolanowych w postaci krzemionkowych popiołów lotnych w późnych okresach czasowych. Po 180 dniach dojrzewania największe mikrorysy zaobserwowano w betonie referencyjnym.

Wpływ dodatku mineralnego w postaci mikrokrzemionki jest znaczący w początkowej fazie dojrzewania, co wpływa na parametry wytrzymałościowe betonu w młodym wieku. Może to mieć istotne znaczenie w kwestii produkcji prefabrykatów betonowych. Krzemionkowe popioły lotne spowalniają procesy powstawania faz w strukturze kompozytu. Powoduje to powiększanie się mikrorys w strefie pomiędzy kruszywem grubym a matrycą cementową w betonach młodych. Na podstawie wyników z powyższych badań można wyprowadzić kilka wniosków.

- Dodatek krzemionkowych popiołów lotnych oraz

mikrokrzemionki zagęszczonej modyfikuje mikrostrukturę ITZ.

- Beton FA00+SF10 w młodym wieku charakteryzował się najmniejszą szerokością mikrorys w warstwie stykowej pomiędzy kruszywem grubym a zaczynem.

- Dodatek 10% mikrokrzemionki oraz 10% krzemionkowych popiołów lotnych odznaczał się najmniejszymi uszkodzeniami, w strefie ITZ, po 180 dniach dojrzewania.

- Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że mikrokrzemionka jest aktywna, w wysokim stopniu, przez cały okres dojrzewania kompozytu. Aktywność puculanowa krzemionkowego popiołu lotnego uwidacznia się natomiast dopiero po dłuższym czasie.

- Największy progres zmniejszania się uszkodzeń pomiędzy kruszywem grubym a matrycą uzyskano w betonie z 30% dodatkiem pucolan.

- Zmniejszenie szerokości rozwarcia mikrorys w strefie ITZ, a co za tym idzie polepszenie szczelności materiału przyczynia się do zwiększenia trwałości betonu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Czarnecki L., Kurdowski W., Tendencje kształtujące przyszłość betonu, Konferencja Naukowo-Techniczna Dni Betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wisła, 2006
- [2] Czarnecki L., Przyszłość betonu w warunkach zrównoważonego rozwoju, Materiały Budowlane 11/2006
- [3] Runkiewicz L., Wykonywanie, kontrola i odbiór robót budowlanych przy wzmacnianiu konstrukcji żelbetowych, Przegląd Budowlany 10/2011
- [4] Łukowski P., Modyfikacja materiałowa betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2016
- [5] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, Górażdże Cement, Opole, 2002
- [6] Golewski G. L., Sadowski T. S., Rola kruszywa grubego w procesie destrukcji kompozytów betonowych poddanych obciążeniom doraźnym, IZT Sp. z o.o., Lublin, 2008
- [7] Gil D. M., Golewski G. L., Effect of Silica Fume and Siliceous Fly Ash Addition on the Fracture Toughness of Plain Concrete in Mode I. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 416, 012065
- [8] Szostak B., Golewski G., Analiza wytrzymałości na ściskanie betonów z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych oraz nanodemieszki C-S-H, Materiały Budowlane 11/2016
- [9] Dobiszewska M., Beton z dodatkiem mineralnego pyłu odpadowego, Materiały Budowlane 5/2015
- [10] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, WPC, PWN, Kraków, 2010
- [11] Gil D., Golewski G., Korzyści ekologiczne i ekonomiczne z wykorzystania w betonie krzemionkowych popiołów lotnych i mikrokrzemionki zagęszczonej, Materiały Budowlane 10/2018
- [12] Ajdukiewicz A., Aspekty trwałości i wpływu na środowisko w projektowaniu konstrukcji betonowych, Przegląd Budowlany 2/2011, str. 20–29
- [13] Glinicki M. A., Tendencje rozwojowe technologii betonu, Przegląd Budowlany, 12/2007, str. 24–30
- [14] Golewski G. L., Związek makroskopowej odporności na pękanie z wielkością mikrorys w betonach z dodatkiem popiołów lotnych, Przegląd Budowlany 5/2016
- [15] Józwiak-Niedźwiecka D., Brandt A. M., Ranachowski Z., Zarastanie rys w zaprawach cementowych z popiołem wapiennym zbrojonych rozproszonymi włóknami, Cement Wapno Beton 1/2012
- [16] Prokopski G., Halbiniak J., Langier B., Właściwości wytrzymałościowe betonu wysokowartościowego w jego procesie dojrzewania, Przegląd Budowlany 3/2003
- [17] Kucharska L., W/C – wskaźnik wpływu warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów zwykłych i WWB i ich podziału, Cement Wapno Beton 2/1999
- [18] Brandt A. M., Kasperkiewicz J. (red.), Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych, IPPT PAN, Warszawa, 2003
- [19] Brandt A. M., Wpływ warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych (BWW), II Konferencja Naukowo-Techniczna Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej Matbud'98, Kraków – Mogilany 1998
- [20] Barnes B.D., Diamond S., Dolch W.L., The contact zone between Portland cement paste and glass aggregate surfaces, Cement and Concrete Research 8/1978
- [21] Zimbelmann R. A., Contribution to the problem of cement-aggregate Bond, Cement and Concrete Research 15/1985
- [22] Golewski G. L., Procesy pękania w betonie z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych, Politechnika Lubelska, Lublin, 2015

TARGI Nowy DOM
Nowe MIESZKANIE

7-8 września
STADION WROCŁAW

➔ bogata oferta mieszkań z rynku pierwotnego i wtórnego
➔ bezpłatne porady specjalistów ➔ konkursy i promocje targowe

targimieszkaniowe.pl