

Wpływ stosowania szkła odpadowego na właściwości zaprawy

INFLUENCE OF THE WASTE GLASS USES ON THE CEMENT MORTAR
PROPERTIES

Streszczenie

W niniejszym artykule opisano wpływ szkła odpadowego na właściwości zaprawy cementowej. Do badań zastosowano barwione szkło odpadowe w dwóch formach: słuźczki szklane o uziarnieniu $0,125\pm 4$ mm wykorzystywanej jako kruszywo drobne i mączki szklanej o uziarnieniu poniżej $0,125$ mm wykorzystywanej jako zamiennik cementu. Oba rodzaje szkła uzyskano w wyniku kruszenia i mielenia brązowych szklanych butelek jednego pochodzenia. Badania prowadzone na zaprawach, w których piasek w całości został zastąpiony słuźczką szklaną lub cement w 20% został zastąpiony przez mączkę szklaną.

W pracy określono wpływ stosowania słuźczki szklanej i mączki szklanej na podstawowe własności technologiczne zaprawy cementowej, tj. na czas wiązania, konsystencję oraz wytrzymałość na ściskanie i zginanie. Ponadto określono czy stosowanie słuźczki szklanej może być przyczyną wystąpienia ekspansji na skutek zachodzenia reakcji alkalia-krzemionka. Zbadano też mikrostrukturę próbek pod skaningowym mikroskopem elektronowym.

Abstract

In this paper the waste glass influence on the of cement mortar properties was described. The colored waste glass in two different forms were used: glass cullets with a grain size of 0.125 ± 4 mm used as fine aggregate and a glass powder with a grain size below 0.125 mm used as a cement substitutes materials. The both types of glass were obtained by crushing and milling a brown glass bottles of the same origin. Tests were carried out

on a mortars in which sand was entirely replaced by glass cullet or 20% of cement was replaced by glass powder.

In the article determined the influence of the use of glass cullet and glass powder on the cement mortar basic technological properties such as on setting time, consistency, as well as flexural and compressive strength. Moreover, it was determined whether the use of glass cullet could be the cause of the expansion caused by the alkali-silica reaction. The samples microstructure was also examined under a scanning electron microscope.

1. Wstęp

Beton jest jednym z najszerzej rozpowszechnionym w świecie materiałem budowlanym. Badaniom nad rozwojem technologii jego wytwarzania poświęconych jest wiele prac naukowych. Wiele z nich koncentruje się nad możliwością wykorzystania w nich różnych materiałów odpadowych i ubocznych z innych gałęzi przemysłu, zarówno do wytwarzania betonu jak i samego spoiwa. Materiały takie mogą mieć różny wpływ na właściwości betonu. Granulowane żużle wielkopiecowe, które latami były traktowane jak odpad i składowane na hałdach obecnie są pożądanym materiałem do wytwarzania cementu [1]. Spoiwa, które zawierają granulowane żużle wielkopiecowe jak i inne dodatki mineralne, które norma PN-EN 206 [2] zaliczane do grupy II pozwalają na poprawę właściwości betonu wpływając na jego trwałość i wytrzymałość. Inne materiały odpadowe nie charakteryzują się tak korzystnymi cechami, ale w betonie mogą pełnić rolę dodatków typu I będąc wypełniaczami. Stosując takie materiały należy jednak pamiętać by do składu betonu nie wprowadzić składników mogących na niego działać niekorzystnie i zmniejszać jego trwałość. Byłoby szczególnie niekorzystne, gdyby w składzie betonu znalazły się składniki wywołujące jego korozję wewnętrzną [1, 3]. Degradacja następująca w ten sposób może być bardziej niebezpieczna od wywołanej czynnikami środowiskowymi dlatego, że zachodzić może jednocześnie w całej objętości betonu, a nie postępować od jego powierzchni. Czynnikiem, które potencjalnie mogą występować w materiałach odpadowych i które mogą zmniejszać trwałość kompozytów cementowych są miedzy innymi siarczany, chlorki czy też reaktywna krzemionka. Materiałem odpadowym, który potencjalnie w całości może się składać z reaktywnej krzemionki jest szkło odpadowe.

Szkło jest materiałem, który nadaje się do recyklingu i przetwarzając je względnie łatwo jest je ponownie wykorzystać. W Europie recykling szkła zalicza się do najbardziej zaawansowanych i w niektórych krajach nawet 85% opakowań szklanych wytwarza się ze szkła recyklowanego [4]. W Polsce jednak tylko względnie niewielki procent szkła zostaje przetopiony. Znaczna część szklanych opakowań i powstałej z nich stłuczki szklanej jest deponowana na komunalnych lub dzikich wysypiskach. Powstaje więc problem ich ewentualnego ponownego zagospodarowania.

W technologii betonu szkło odpadowe może zostać potencjalnie zagospodarowane na dwa sposoby, jako niereaktywny wypełniacz lub jako reaktywny dodatek puculanowy. Forma w jakiej szkło odpadowe jest wykorzystywane do produkcji betonu zależy w głównej mierze od wielkości jego ziaren oraz reaktywności. Zwykle uważa się, że właściwości puculanowe wykazywać może szkło o uziarnieniu mniejszym niż $0,038 \pm 0,3$ mm [5,6] i w takiej postaci może być stosowane jako zamiennik cementu. Szkło odpadowe o większym uziarnieniu stosowane może być jako kruszywo. W takiej formie, w przeciwieństwie do szkła będącego dodatkiem puculanowym, niepożądana jest jego duża aktywność chemiczna, która może powodować degradację betonu na skutek reakcji alkalia-krzemionka. Aktywność ta zależna jest od składu chemicznego i uziarnienia szkła. Zachodzeniu reakcji puculanowej i alkalia-krzemionka szkła poświęcono wiele prac [5, 7-12]. Analizowano w nich m. in. wpływ wykorzystania szkła różnego rodzaju na te procesy. We wcześniejszych badaniach [12] analizowano proces degradacji wskutek reakcji alkalia-krzemionka zapraw, do których sporządzenia użyto szkła odpadowego pochodzącego z rozkruszenia wyselekcjonowanych opakowań jednego rodzaju. Stwierdzono, w nich, że w normowym okresie przeprowadzania badań stłuczka szklana nie musi wywoływać szkodliwej reakcji alkalia-krzemionka.

Celem niniejszej pracy jest przeanalizowanie wpływu takiego „nieszkodliwego”, czyli niereaktywnego szkła na podstawowe właściwości technologiczne zapraw w przypadku gdy jest stosowane zarówno jako drobnomielona mączka szklana, jak również jako drobne kruszywo zastępujące frakcje piasku kwarcowego w stosunku masowym 1:1.

2. Materiały do badań

Do wykonania badań jako spoiwa użyto cementu CEM I 42,5R. Jako kruszywo stosowano piasek normowy CEN PN-EN 196-1 [13] oraz stłuczkę szklaną ze szkła odpadowego. Szkło odpadowe użyto też w formie mączki szklanej. Stłuczkę i mączką szklaną pozyskano w wyniku kruszenia i mielenia opakowań szklanych ze szkła brązowego jednego pochodzenia. Mielenia szkła dokonywano w młynku kulowym ze stalowymi kulami. Po rozdrobnieniu szkła odpadowe w procesie przesiewania podzielono na poszczególne frakcje. Frakcje szkła 0÷0,125 zakwalifikowano jako mączkę. Ziarna szkła większych frakcji posłużyły do sporządzania stosów kruszyw zgodnych z uziarnieniem jakie musi spełniać piasek kwarcowy w zaprawach do poszczególnych badań.

W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny zastosowanego cementu i szkła. Na jej podstawie można stwierdzić, że badanym szkłem jest szkło sodowo-wapienne. Gęstość cementu i szkła wyniosły odpowiednio 3250 i 2495 kg/m³.

Tabela 1. Skład chemiczny cementu i szkła [%]

Materiał	SiO	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl
Cement	19,07	63,99	5,43	1,66	2,79	0,25	0,99	3,41	0,069
Szkło	63,89	11,65	4,00	1,25	-	19,21	-	-	-

3. Metody badań

Badania były wykonywane na próbkach zaczynów i zapraw sporządzonych z przyjętym stosunkiem $w/c = 0,5$. Badano próbki, w których całość masy kruszywa zastąpiono przez stłuczkę szklaną lub 20% masy spoiwa cementowego zastąpiono przez mączkę szklaną.

W przypadku badań spoiwa z dodatkiem mączki na próbkach zaczynów określono wpływ stosowania tego dodatku na początek czasu wiązania na podstawie metodyki normy PN-EN 196-3 [14], oraz na przemiany fazowe. Jako próbkę referencyjną wykonano zaczyn cementowy. Przemiany fazowe zachodzące w okresie 28 dni badano metodą dyfraktometrii rentgenowskiej z wykorzystaniem dyfraktometru Empyrean (PANalytical). Zaczyny do tych badań przechowywane były w foliowych woreczkach, do których po 24 godzinach dodano wody destylowanej by zapewnić odpowiednie warunki dojrzewania.

Na zaprawach z kruszywem normowym i ze stłuczką szklaną oznaczono konsystencję metodą stolika rozplwywu wg PN-EN 1015-3 [15] oraz wytrzymałość na ścislenie i zginanie wg PN-EN 196-1 [13] po 2, 7 i 28 dniach. Stłuczka szklana do wykonania tej zaprawy posiadała uziarnienie identyczne co piasek normowy CEN PN-EN 196-1 [13]. Jako zaprawą referencyjną wykonano normową zaprawę cementową z piaskiem kwarcowym.

Mikrostruktura przelamów 28-dniowych próbek zapraw została również przebadana z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego Quanta FEG 250 (FEI)

wyposażonego w mikroanalizator rentgenowski EDS (EDAX). Analizy przeprowadzono w warunkach niskiej próżni (30 Pa) na próbkach nienapylonych przy pomocy wiązki elektronów o napięciu 5 kV.

Dodatkowo zaprezentowano wyniki badań reaktywności alkalicznej stłuczki szklanek wykonane metodą przyspieszoną wg ASTM C 1260 [16].

4. Opisanie wyników badań

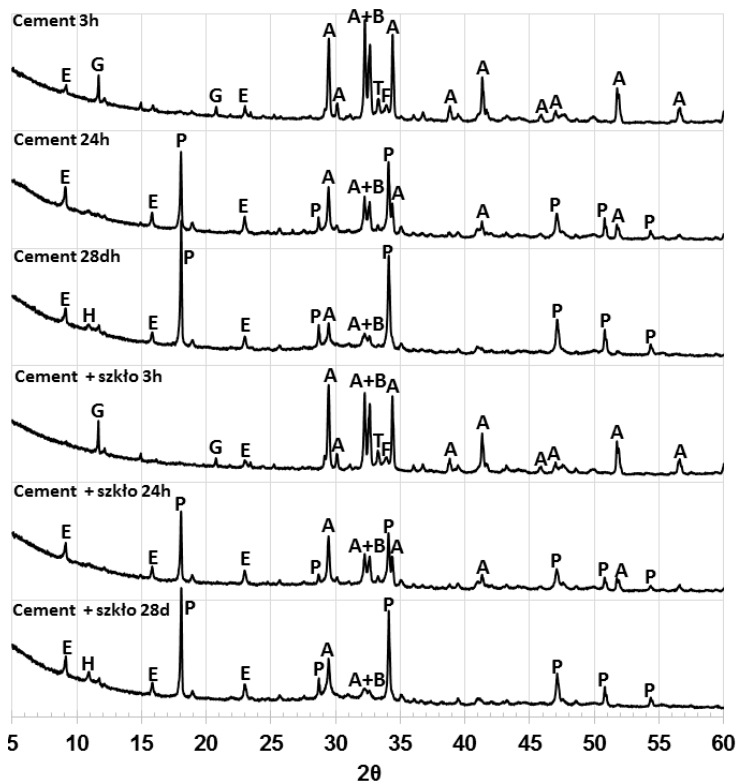
4.1. Wyniki badań zaczynów z mączką szklaną

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badania początku czasu wiązania spoiwa, w którym 20% cementu zastąpiono mączką szklaną w odniesieniu do wyniku uzyskanego dla czystego spoiwa cementowego. Widać, że stosowanie badanej stłuczki podobnie jak stosowanie popiołu lotnego [17], wydłuża okres czasu, po którym rozpoczyna się proces wiązania spoiwa

Tabela 2. Czas wiązania

Spoivo	Początek czasu wiązania [min]
Cement CEM I 42,5R	415
Spoivo cementowe z mączką szklaną	450

Po związaniu cementu z mączką szklaną badano zachodzące w nim przez okres 28 dni przemiany fazowe, co zobrazowano na rysunku 1. Umieszczono na nim dyfraktogramy wykonane po 3 i 24 godzinach oraz po 28 dniach dojrzewania zaczynów. Widoczne są przede wszystkim refleksy pochodzące od faz klinkierowych oraz powstających w skutek ich hydratacji produktów, głównie portlandytu. Różnice pomiędzy analizami zaczynu referencyjnego i zawierającego mączkę szklaną, które zostały wykonane w różnych terminach polegają na zmianie intensywności refleksów od poszczególnych faz. Z czasem podnosi się też tło, co świadczy o powstawaniu fazy C-S-H o charakterze amorficznym. W przypadku zaczynu zawierającego szkło obserwuje się niższe refleksy od portlandytu, jednak nie musi być to efekt jego uczestniczenia w reakcji pucolanowej [1, 17, 18]. Jest to związane z mniejszą zawartością cementu w tej próbce. Świadczą o tym mniej intensywne refleksy od alitu, którego hydratacja jest głównym źródłem portlandytu występującego w zaczynie cementowym [1]. Zarówno w zaczynie cementowym jak i zawierającym mączkę szklaną, przyrost refleksów portlandytu połączony z zanikaniem refleksów od faz klinkierowych i gipsu zachodzi przede wszystkim w okresie pierwszych 24 godzin. Po tym okresie nie stwierdzono zmniejszania refleksów portlandytu, które mogłyby świadczyć o właściwościach pucolanowych mączki [19].



Rys. 1. Dyfraktogramy zaczynów ze spoiwa cementowego oraz mieszanki 80% cementu i 20% mączki szklanej wykonane po 3 i 24 godzinach oraz 28 dniach hydratacji: A – alit, A+B – obszar refleksów wspólnych dla alitu i belitu, E – ettryngit, F – brownmilleryt, G – gips, H – C-S-H, P – portlandyt, T – C_3A .

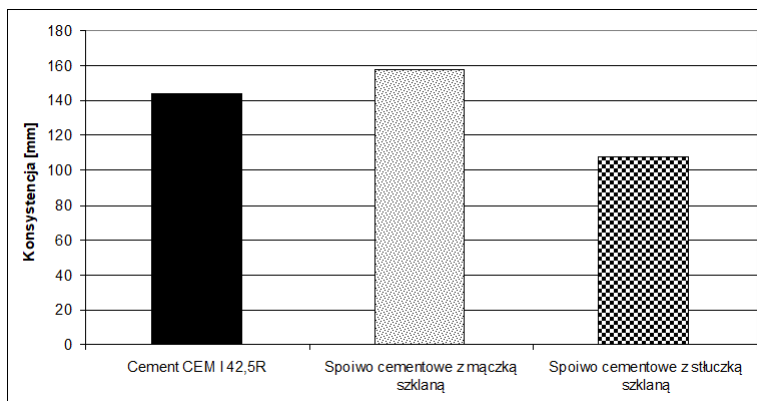
4.2. Wyniki badań zapraw ze szkłem odpadowym

W tabeli 3 przedstawiono zbiorze wyniki porównania wpływu szkła odpadowego pod postacią mączki i słuczki na właściwości technologiczne zaprawy cementowej.

Tabela 3. Właściwości zapraw z szkłem odpadowym

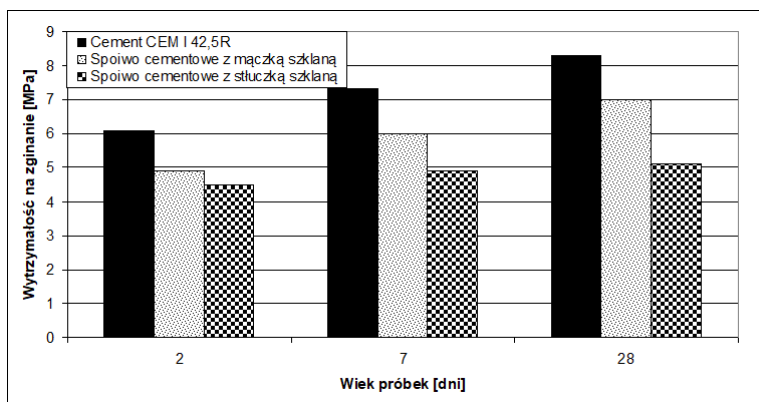
Zaprawa	Konsystencja [mm]	Wytrzymałość na zginanie po dniach [MPa]			Wytrzymałość na ściskanie po dniach [MPa]		
		2	7	28	2	7	28
Cement CEM I 42,5R	144	6,1	7,3	8,3	30,9	43,9	51,2
Spoivo cementowe z mączką szklaną	158	4,9	6,0	7,0	24,9	34,3	40,6
Spoivo cementowe z słuczką szklaną	108	4,5	4,9	5,1	22,3	32,3	34,7

Na rysunku 2 porównano konsystencję zapraw mierzoną metodą stolika rozplywu. Widać na nim, że szkło odpadowe stosowane jako maczka będąca zamiennikiem cementu i stosowane jako stłuczka będąca zamiennikiem piasku ma odmienny wpływ na płynność zaprawy. Zastosowanie stłuczki szklanej spowodowało znaczącą redukcję płynności i otrzymano jedynie minimalny rozplyw. Świadczyć to może o większej niż dla piasku normowego wodorzędności stłuczki szklanej. Równocześnie stwierdzono, że zastąpienie cementu przez maczkę szklaną spowodowało zwiększenie płynności. To może być spowodowane faktem zwiększenia objętościowego udziału frakcji pylastych w składzie zaprawy. Dzieje się to na skutek różnicy w gęstości cementu i szkła, którym to jest zastępowany. Odwrotny efekt otrzymano w przypadku zastępowania piasku, przez stłuczkę szklaną. W tym przypadku zastąpienie piasku, przez lżejsze szkło powoduje zwiększenie udziału objętościowego kruszywa w zaprawie, a tym samym spadek zawartości frakcji pylastych/ultradrobnych, co jest niekorzystne z punktu widzenia urabialności [18]. Zmiany objętości spoiwa i kruszywa wynikające ze stosowania szkła odpadowego są niewielkie i wynoszą poniżej 1%.

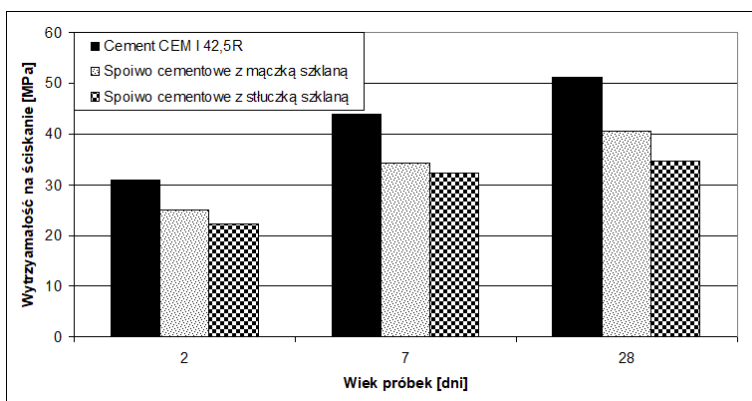


Rys. 2. Konsystencja zapraw

Na rysunkach 3 i 4 pokazano wpływ szkła odpadowego na kształtowanie się wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i na ściskanie zapraw w okresie 28 dni. Zarówno zastosowanie maczki jak i stłuczki szklanej spowodowało uzyskanie niższych wytrzymałości niż dla próbki referencyjnej. W przypadku zastosowania maczki jako zamiennika cementu spadek wytrzymałości wynosił zawsze około 20%, czyli odpowiadał stopniowi w jakim cement został zastąpiony przez drobnozmielone szkło odpadowe. Tym samym nie można stwierdzić, by badana maczka szklana wykazywała właściwości pucolanowe.



Rys. 3. Wytrzymałość na zginanie



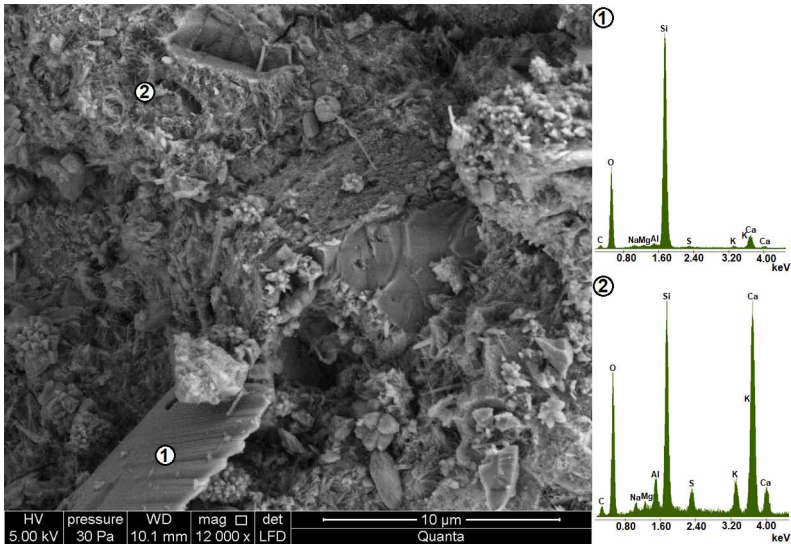
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie

W przypadku zastosowania jako kruszywa stłuczki szklanej stwierdzono większe spadki wytrzymałości wynoszące około 30%. Procentowo ograniczenie wytrzymałości w stosunku do zaprawy referencyjnej nie zmienia się jednak w czasie, tak samo jak w przypadku próbek z mączką. Z uwagi na to można stwierdzić, że nie jest ono spowodowane zachodzeniem procesów chemicznych. Może ono wynikać tak z właściwości samego szkła jak i z właściwości powstałej strefy kontaktowej zaczyn-kruszywo. W celu sprawdzenia tego w dalszym etapie przeprowadzono badania mikrostruktury przygotowanych zapraw.

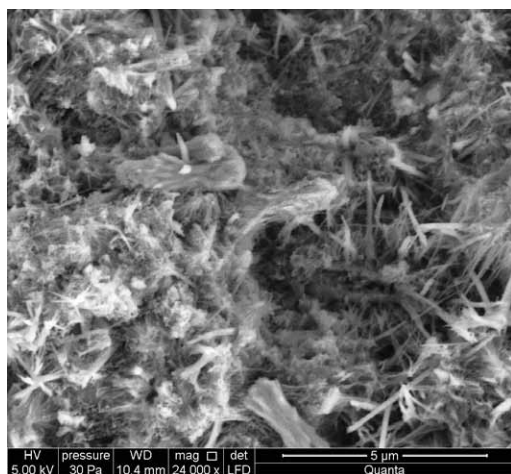
Na rysunkach 5, 6 i 7 przedstawiono mikrostrukturę zapraw z mączką i stłuczką szklaną. W przypadku mikrostruktury zaprawy z mączką szklaną (rys. 5) widoczne są drobne ziarna szkła osadzone w fazie C-S-H. Powstała faza C-S-H przybrała postać włóknistą lub „plastra pszczelego” (rys. 6) co jest charakterystyczne dla procesu wiązania cementu bez dodatków mineralnych [1]. Nie stwierdzono wytworzenia się amorficznej, zwartej mikrostruktury, którą stwierdzano w przypadku hydratacji cementu w obecności mączki szklanej wykazującej właściwości pucolanowe [1, 11]. Analiza składu pierwiastkowe fazy C-S-H wykazała wysokie wskazania od krzemu, co można tłumaczyć obecnością ziaren szkła rozproszonych w matrycy zaczynu.

Na rysunku 7a przedstawiono mikrostrukturę zaprawy ze stłuczką szklaną. Wiele ziaren szkła cechuje wydłużony płaski kształt. Różni to stłuczkę szklaną od piasku, którego ziarna zazwyczaj są bardziej regularne. Ziarno mączki szklanej obserwowane na rys. 5 również posiadało formę cienkiej płytki. Na podstawie tego można stwierdzić, że ziarna szkła mają większą powierzchnię właściwą od ziaren piasku. Stanowi to, obok różnicy w gęstości szkła i piasku kolejną przyczynę, na podstawie której można wytłumaczyć mniejszą płynność zapraw ze stłuczką szklaną. Większa powierzchnia właściwa wpływa bowiem na zwiększenie wodorządności [18, 20]. Pomędzy nieforemnymi ziarnami kruszywa łatwiej też mogą powstawać pustki powietrzne, i potrzeba więcej zaczynu by je wypełnić, co może wpływać na obniżenie parametrów wytrzymałościowych zaprawy.

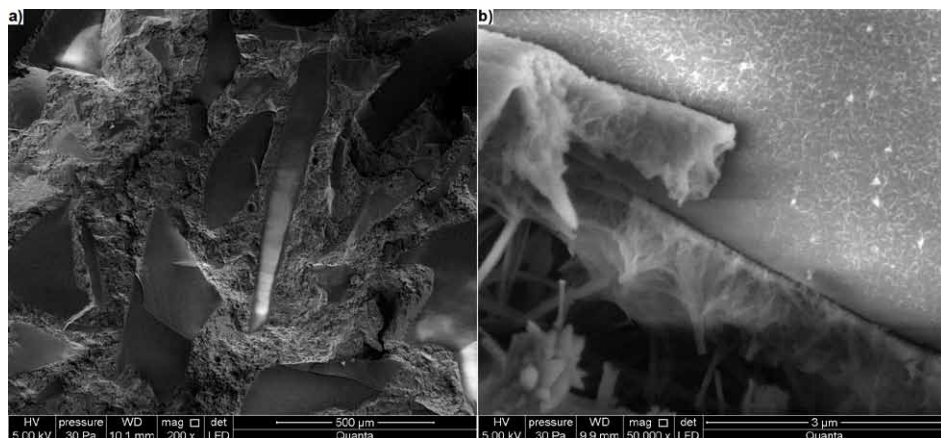
Zauważono również, że pomiędzy szkłem, a zaczynem cementowym nie widać rys, czy większych porów co świadczy o dobrym wiązaniu zaczynu z kruszywem (Rys. 7a i b). W strefie tej obserwuje się jedynie, w niektórych miejscach nagromadzenia charakterystycznych płytkowych kryształów portlandytu. Same ziarna szkła nie wykazują też śladów znacznego spękania. Zwykle ich powierzchnie były gładkie, ale niektóre zostały pokryte przez produktu przypominające załączki fazy C-S-H powstające w wyniku reakcji pucolanowej (Rys. 7b). Mogą to być produkty rozpoczynającej się reakcji alkalia-krzemionka [3].



Rys. 5. Mikrostruktura przełamu zaprawy z mączką szklaną wraz z analizami EDS w punktach 1 i 2.



Rys. 6. Faza C-S-H z ettryngitem w matrycy zaczynu cementowego z mączką szklaną.



Rys. 7. Mikrostruktura zaprawy z stłuczką szklaną.

O braku reaktywności badanego szkła odpadowego świadczyć mogłyby wyniki badania ekspansji zaprawy w 1M roztworze NaOH w 80 °C wykonane wg normy ASTM C 1260 (Rys. 8.). Uzyskana ekspansja nie przekroczyła progu 0,1%, kiedy to można uznać, że dochodzi do potencjalnie niebezpiecznej reakcji alkalia-krzemionka. Są to wyniki zgodne z analogicznymi badaniami szkła brązowego wykonanymi przez Najduchowską et Al. [10]. Odmienne wyniki dla takich szkieł zostały otrzymane jednak przez Jin et Al. [21] czy Park i Lee [22]. W swej pracy Park i Lee [22], przedstawili, że szkło brązowe jest bardziej podatne na reakcje alkalia-krzemionka i już po 6 dniach badania, może przekroczyć 0,2% próg ekspansji. Co więcej we wcześniejszej pracy [12] ustalono, że badane szkło może powodować znaczną ekspansję zapraw w przypadku długotrwałego przechowywania w roztworze NaOH. Tym samym o braku reaktywności badanego szkła można mówić wyłącznie w kontekście wykonywania badań w okresie przewidywanym przez normę, który powinien zapewnić, by w warunkach rzeczywistych konstrukcja wykonana z ba-

danego materiałem mogła być prawidłowo eksploatowana. W warunkach ekstremalnej ekspozycji na czynniki szkodliwe badane szkło jednak może wykazywać reaktywność. Efekty tego obrazuje dobrze zdjęcie mikroskopowe szliflu półroczej zaprawy (Rys. 9.), która początkowo była wykorzystana do badania wg ASTM C 1260 [16], a następnie przechowywano ją w wodzie [12]. Widać na nim silnie spękane ziarna szkła i pojedyncze rysy rozchodzące się przez zaczyn.



Rys. 8. Ekspansja zaprawy z słuczką szklaną wg ASTM C 1260 [16]



Rys. 9. Spękania w 0,5-roczej zaprawie

5. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań, w okresie ich trwania zastosowane szkło nie wykazało istotnej aktywności chemicznej. Nie stwierdzono, by badane brązowe szkło opakowaniowe wchodziło w reakcję pucolanową, czy też reakcję alkalia-krzemionka. Tym samym przebadany wpływ szkła na właściwości kompozytu cementowego miał charakter fizyczny.

Stwierdzono, że zastosowanie szkła odpadowego zarówno w formie zamiennika spoiwa jak i kruszywa wpływa na obniżenie parametrów wytrzymałościowych zaprawy. W przypadku zastąpienia cementu przez mączkę szklaną jest to związane ze zmniejszeniem udziału spoiwa i jest do niego proporcjonalne. W przypadku zastosowania stłuczki szklanej takowy spadek związany jest ze kształtem jej ziaren i różnicami w składzie objętościowym wynikającymi ze względnie małej gęstości szkła. Mogą na to mieć wpływ również mechaniczne właściwości szkła. Różnice w składzie objętościowym mogą być też odpowiedzialne za odmienny wpływ stosowania mączki i stłuczki szklanej na konsystencję zaprawy.

W świetle wcześniejszych badań należy mieć na uwadze, że niereaktywne szkło jakie zastosowano w przeprowadzonych badaniach w warunkach ekstremalnych [12], lub w przypadku wystąpienia w układzie jakiegoś aktywatora może jednak wykazywać aktywność chemiczną. Tym samym w dalszych badaniach nad możliwościami stosowania szkła niereaktywnego, można przebadać wpływ różnych czynników aktywujących na jego właściwości chemiczne. Do czynników wpływających na reaktywność należy uzianienie, a w przeprowadzonych badaniach zastosowana mączka szklana (frakcja 0÷0,125 mm) cechowała się maksymalną wielkością ziaren, która według niektórych źródeł [5] nie pozwala na uzyskania aktywności pucołanowej. Należałoby wykonać również badania porównawcze nad innymi rodzajami szkieł, gdyż wiadomo, że nawet szkła opakowaniowe odmiennego koloru wykazują inne właściwości [10, 21-23].

Literatura

- [1] W. Kurdowski: *Chemia Cementu i Betonu*, SPC, Kraków 2010,
- [2] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton – Wymagania Właściwości, produkcja i zgodność,
- [3] Z. Owsiak: *Korozja wewnętrzna betonu*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2015,
- [4] A. Kuśnierz: *Recykling Szkła, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych* 2010, 3, 22-33,
- [5] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez: *Studies on concrete containing ground waste glass*, Cement and Concrete Research 2000, 30, 91–100,
- [6] A.M Matos, J.Sousa-Coutinho: *Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement*, Construction and Building, Materials 2012, 36, 205–215,
- [7] A. Shayan, A. Xu: *Value-added utilisation of waste glass in concrete*, Cement and Concrete Research 2004, 34, 81-89,
- [8] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou: *Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet*, Cement and Concrete Composites 2011, 33, 19-29,
- [9] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou: *Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars*, Construction and Building Materials 2010, 24, 1309-1312,
- [10] M. Najduchowska, E. Pabiś, G. Rolka, T. Baran: *Właściwości betonu z zastosowaniem stłuczki szklanej*, Dni Betonu 2018,
- [11] J. Deja, E. Gołek, Ł. Kołodziej, A. Różycka: *Właściwości zaczynów z klinkieru portlandzkiego z dodatkiem szkieł przemysłowych*, Dni Betonu 2010,
- [12] P. Czapiak: *Microstructure and Degradation of Mortar Containing Waste Glass Aggregate as Evaluated by Various Microscopic Techniques*, Materials 2020, 13, 2186,
- [13] PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości,
- [14] PN-EN 196-3:2016-12 Metody badania cementu – Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości,
- [15] PN-EN 1015-3:200 Metody badań zapraw do murów – Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplywu),
- [16] ASTM C1260 – 14 Standard Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method),
- [17] Z. Giergiczny, M. Gawlicki: *Popiół lotny jako aktywny składnik cementów I dodatek mineralny do betonu*, Dni Betonu 2004,
- [18] A. M. Neville: *Właściwości betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2012,

- [19] P. Czapiak, M. Wolniewicz: *Wpływ dużej zawartości pyłu krzemionkowego na mikrostrukturę zaczynu*, Dni Betonu 2018,
- [20] T. Gawenda: *Innowacyjne technologie produkcji kruszyw o ziarnach foremnych*, Mining Science – Mineral Aggregates 2015, 22, 45-59,
- [21] W. Jin, C. Meyer, S. Baxter, “*Glascrete*” – *concrete with glass aggregate*, ACI Materials Journal 2000, 97, 208-213,
- [22] S.-B. Park, B.-C. Lee: *Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers*, Cement and Concrete Research 2004, 34, 1145–1152,
- [23] K. Borek, P. Czapiak, R. Dachowski: *Recycled glass as a substitute for quartz Sand in silicate products*, Materials 2020, 13, 1030.

