

*Marzena Najduchowska
Ewelina Pabiś
Grzegorz Rolka
Tomasz Baran*

Właściwości betonu z zastosowaniem stłuczki szklanej

PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING WASTE GLASS

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono właściwości betonów z udziałem stłuczki szklanej różnego pochodzenia. Do badań zastosowano stłuczkę szklaną: z szyb okiennych flot, szyb samochodowych, ze szkła „bezpiecznego”, szkła opakowaniowego bezbarwnego, zielonego i brązowego oraz szkła kineskopowego. W składzie betonu stłuczkę szklaną zastosowano jako zamiennik cementu, piasku oraz równocześnie cementu i piasku.

W pracy zbadano aktywność pucolanową zmielonej stłuczki szklanej. Otrzymane wartości wskaźnika aktywności pucolanowej badanych próbek były porównywalne z wynikami aktywności pucolanowej krzemionkowych popiołów lotnych.

Przeprowadzone badania reakcji alkalicznej metodą przyspieszoną w większości przypadków wykazały brak ekspansji badanych próbek w 1N NaOH. Wydłużenie czasu mielenia stłuczki szklanej bardzo korzystnie wpłynęło na kształtowanie reakcji ASR. Najkorzystniejszym wariantem okazało się równoczesne zastąpienie cementu i kruszywa stłuczką szklaną.

Przeprowadzone badania wytrzymałości na ściskanie betonów, w których zastosowano stłuczką szklaną jako zamiennik cementu wykazały, że po 28 dniach dojrzewania betonu otrzymuje się obniżenie wytrzymałości w porównaniu z próbą kontrolną. Po 90 dniach dojrzewania obserwuje się znacznie mniejszy wpływ obecności stłuczki szklanej na obniżenie wytrzymałości betonów. Świadczy to o intensyfikacji reaktywności pucola-

dr inż. Marzena Najduchowska – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie

mgr inż. Ewelina Pabiś – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie

mgr inż. Grzegorz Rolka – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu

dr inż. Tomasz Baran – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie

nowej stłuczki szklanej z czasem. Uzyskane wyniki wytrzymałości korelują z określoną aktywnością pucolanową.

W przypadku zastosowania stłuczki szklanej jako zamiennika kruszywa drobnego, badania wykazały wpływ rodzaju zastosowanego szkła na wytrzymałość na ściskanie betonu.

Abstract

This paper presents the properties of concrete with waste glass derives from different sources. In order to achieve the aim of the study the glass cullet from flat glass, safety laminated glass, colorless, green and brown container glass and cathode ray tube (CRT) glass were applied.

Recycled glass was used in concrete as cement replacement, as fine aggregate replacement and finally as cement and fine aggregates replacements simultaneously.

In study the pozzolanicity of glass powder was investigated. The received results of pozzolanic activity of the test samples were comparable to pozzolanic activity of siliceous fly ashes.

The conducted tests in terms of alkali - silica reaction (ASR) by accelerated test method have proved no expansion of test samples in 1N NaOH solution, in most cases.

It was reported that extension of the grinding time of glass cullet has beneficial influence on the silica-alkali reaction. It has turned out that the most positive variant in reference to incorporation of glass cullet in concrete is using glass waste as cement and aggregate replacements simultaneously.

The results of compressive strength of concretes with glass cullet as cement replacement resulted in decrease in compressive strength at 28 days as compared to the control mixes.

However, at 90 days the impact of present of waste glass as the cement replacement in concrete on the deterioration of compressive strength of concrete is lessened.

This may be attributed to the intensification of the pozzolanic reactivity of waste glass with time. The compressive strength test results correlate with determined pozzolanic activity of glass powder.

In terms of using waste glass as fine aggregate replacement in concrete the results have indicated the impact of the type of waste glass on compressive strength of concrete.

1. Wstęp

System gospodarki odpadami w Polsce wciąż boryka się z istotnym problemem jakim jest nagminne unieszkodliwianie odpadów poprzez ich składowanie. Mowa tu w szczególności o tych odpadach, które ze względu na swoje właściwości, potencjalnie mogłyby być ponownie wykorzystane materiałowo lub energetycznie [1]. Do takich odpadów należy m.in.: stłuczka szklana, która posiada możliwość wielokrotnego recyklingu. Szkło z jednej strony to kruchy i podatny na destrukcję materiał, z drugiej to jedna z najtrwalszych substancji, jakie zna współczesny świat, potrafiąca przetrwać w stanie nienaruszonym – zakopana lub zatopiona – tysiące lat. Szacuje się, że w Polsce na jednego mieszkańca przypada około 18 kg odpadów szklanych w okresie jednego roku [2]. Z kolei dane liczbowe odnośnie odzyskiwania i wykorzystania stłuczki szklanej w Polsce są rozbieżne, jednakże nie podlega dyskusji fakt, że znaczna jej część trafia na wysypiska komunalne lub co gorsze na „dzikie składowiska”. Niewątpliwie jest to rozwiązanie niekorzystne szczególnie ze względu na aspekt ekologiczny i ekonomiczny.

Szkło jako unikalny materiał posiadający zdolność do zachowywania swoich właściwości chemicznych mimo wielokrotnego przetwarzania i odznaczający się długim cyklem życia stanowi idealny materiał wtórny. W Polsce nie wykorzystuje się potencjału jaki posiada stłuczka szklana, wciąż korzystamy z najprymitywniejszego sposobu jej pozbycia się, mianowicie poprzez jej składowanie co może doprowadzić do tego, że w przeciągu najbliższych dziesięciu lat może dojść do sytuacji, w której składowiska nie będą zdolne do gromadzenia stłuczki szklanej.

Zarówno w Polsce, jak i innych krajach głównym kierunkiem recyklingu stłuczki szklanej opakowaniowej i szkła płaskiego jest jej użycie jako surowca wtórnego do topienia i produkcji wyrobów w hutach szkła. Ze względu na wysokie wymagania, odnośnie jakości odpadów szklanych jakie mogą być przyjmowane przez huty, stłuczka przed ponownym wykorzystaniem musi przejść skomplikowany proces uzdatniania.

W Polsce nadal brakuje sortowni oraz specjalistycznych centrów selekcji, gdzie odpady szklane byłby czyszczone i segregowane oraz brakuje odpowiedniego systemu ewidencji powstających odpadów [3]. Ponadto huty szkła nie utylizują stłuczki, która pochodzi z szyb samochodowych, ze szkła „bezpiecznego”, szkła krysztalowego, luster czy szkła pochodzącego z lamp kineskopowych, które szczególnie stanowi poważny problem przy zagospodarowaniu odpadów szklanych [4].

Na świecie oraz w Polsce wciąż poszukuje się innowacyjnych rozwiązań w zakresie racjonalnego ekonomocno-ekologicznego zagospodarowania stłuczki szklanej. Mimo, iż zagadnienie to nie jest nowe nadal nie potrafimy sobie z nim poradzić i efektywnie podejść do tego problemu.

W związku z faktem, iż budownictwo stanowi kluczową branżę całej gospodarki w Unii Europejskiej, ponadto silnie wpływa na środowisko, sektor ten stanowi obiecujący rynek dla recyklingu stłuczki szklanej. W niektórych krajach dawno podjęto tą inicjatywę i zaczęto badać i sukcesywnie wprowadzać innowacyjne produkty budowlane z dodatkiem stłuczki szklanej poddanej wcześniejszemu procesowi uzdatniania [3, 5, 6, 8, 13, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 31, 32]. Badania między innymi były prowadzone w kierunku możliwości zastosowania stłuczki szklanej jako zamiennika kruszywa naturalnego do betonu, jako zamiennik gruntów naturalnych, które z powodzeniem mogą być stosowane w inżynierii geotechnicznej. Podejmowano również z różnym skutkiem, próby wykorzystania tego materiału do produkcji ceramiki, spoiw, zapraw, betonu, materiałów

izolacyjnych, do produkcji włókien szklanych, szkła spienionego, mat, płyt izolacyjnych, laminatów oraz materiałów bitumicznych.

Głównym problemem w czasie stosowania tego materiału w zaprawach i betonach z udziałem cementu jest fakt, że szkło jest niestabilne w środowisku zasadowym, dodatkowo uzyskiwano różne wyniki w przypadku zastosowania stłuczki szklanej nieznanego pochodzenia i o różnym stopniu zanieczyszczenia.

2. Cel i zakres badań

Celem badań było wskazanie możliwości zagospodarowania stłuczki szklanej, która nie jest wykorzystywana w hutach produkujących opakowania szklane, do wytwarzania betonu.

Zakres pracy obejmował opracowanie receptur betonów z udziałem stłuczki szklanej, która nie spełnia szczegółowych wymagań jakości akceptowanych przez huty oraz określenie ich właściwości. W związku z utrudnieniami związanymi ze stosowaniem stłuczki szklanej w betonie, szczególną uwagę zwrócono na badania mające na celu sprawdzenie czy użyty materiał nie powoduje reakcji ASR. Do badań zastosowano stłuczkę szklaną różnego pochodzenia: z szyb okiennych flot, szyb samochodowych, ze szkła „bezpiecznego”, szkła opakowaniowego bezbarwnego, zielonego i brązowego oraz szkła kineskopowego.

3. Materiały zastosowane do badań i ich charakterystyka

3.1. Stłuczka ze szkła kineskopowego

Szkło kineskopowe pochodziło z dwóch zakładów zajmujących się przetwarzaniem i odzyskiem odpadów elektronicznych i elektrotechnicznych.

Pozyskana stłuczka stanowiła szkło z wycofanych z eksploatacji telewizorów z wyświetlaczem typu CRT monochromatycznych i kolorowych oraz monitorów komputerowych CRT. W stanie dostawy stłuczka kineskopowa stanowiła mieszaninę szkła zarówno z części ekranowej, jak i stożkowej kineskopu wraz z elementami metalowymi i fragmentami folii. Widok pobranych próbek stłuczki kineskopowej przedstawiono na fotografii 1.

W przypadku stłuczki z szyb samochodowych pobrany materiał do badań stanowiły całe przednie szyby samochodowe. Szyby samochodowe przednie stanowią na ogół szyby warstwowe. Tworzą je co najmniej dwie warstwy szkła, połączone ze sobą jedną lub kilkoma warstwami pośrednimi z tworzywa syntetycznego (fot. 1).

Kolejnym rodzajem stłuczki było szkło bezpieczne laminowane. Składa się ono z dwóch tafli szkła, połączonych jedną lub kilkoma warstwami specjalnej folii (fot. 1).

Przedmiotem badań była również stłuczka z szyb okiennych float (fot. 1).

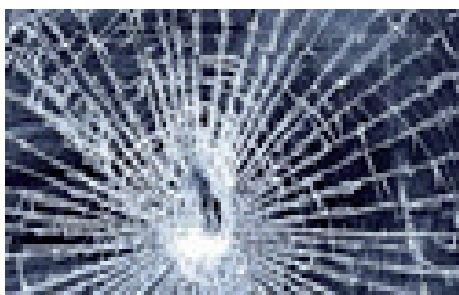
Stłuczka opakowaniowa ze szkła zielonego i brązowego została pozyskana z jednego z większych producentów opakowań w Europie z Huty Szkła Orzesze. Pozyskany materiał stanowiło szkło odpadowe o frakcji 0/7 mm, powstające podczas produkcji opakowań w przemyśle monopolowym i piwiarskim (fot. 1).



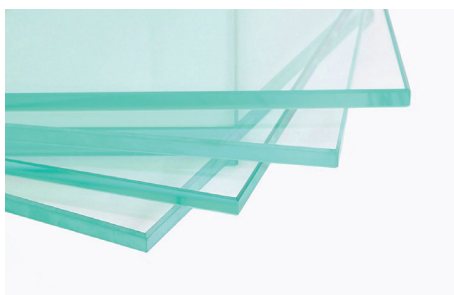
a – stłuczka kineskopowa



b – stłuczka z szyb samochodowych



c – stłuczka ze szkła bezpiecznego laminowanego



d – stłuczka ze szkła float



e – stłuczka opakowaniowa brązowa



f – stłuczka opakowaniowa zielona

Fot. 1. Materiały wyjściowe stłuczki do badań

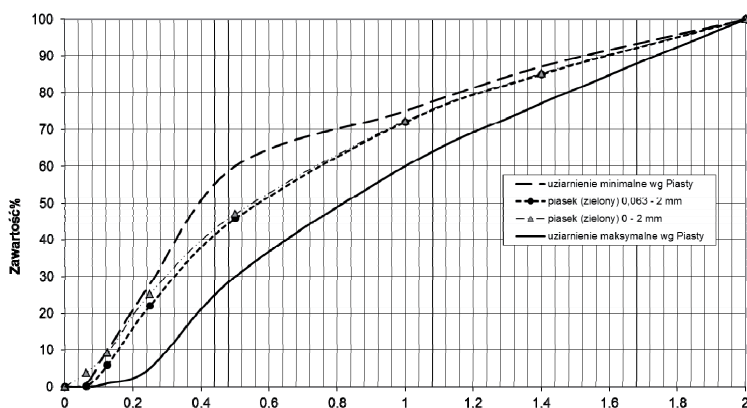
Pobrane materiały szyb samochodowych, szkła bezpiecznego, szkła kineskopowego oraz szyb okiennych wstępnie poddawano procesowi rozkruszenia, w przypadku szkła z folią rozdzielania na mniejsze kawałki oraz oczyszczenia z elementów metalowych (fot. 2).



Fot. 2. Wstępne rozkruszenie stłuczki oraz oddzielenie części metalowych

Tak wstępnie przygotowany materiał poddawano procesowi mielenia w laboratoryjnym młynku kulowym.

Frację piaskową stłuczki szklanej uzyskano podczas przemiału w młynku z założoną pokrywą sitową, umożliwiającą ciągle wysypywanie się rozdrobnionego szkła z komory młynka. Przemiał prowadzono przez czas nieprzekraczający 6 minut, aby ograniczyć zbyt drobny przemiał szkła. Analiza sitowa wykazała, że zawartość pyłów w produkcie zmielonym wynosiła ponad 10%, dlatego też z produktu tego odsiano frakcję poniżej 0,063 mm. Skład ziarnowy dla piasku zielonego przed i po przesiewaniu przedstawiono na rysunku 1.

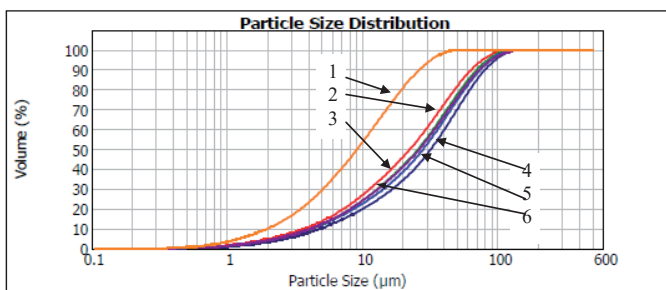


Rys. 1. Skład ziarnowy piasków szklanych 0/2 mm i 0,063/2 mm

W przypadku szyb zawierających folię nie udało się otrzymać frakcji 0/2 mm, z uwagi na to, że krótki przemiał do 5 minut nie umożliwił oddzielenia szkła od folii. Zwiększenie czasu przemiału powodowało uzyskiwanie znacznie drobniejszego materiału.

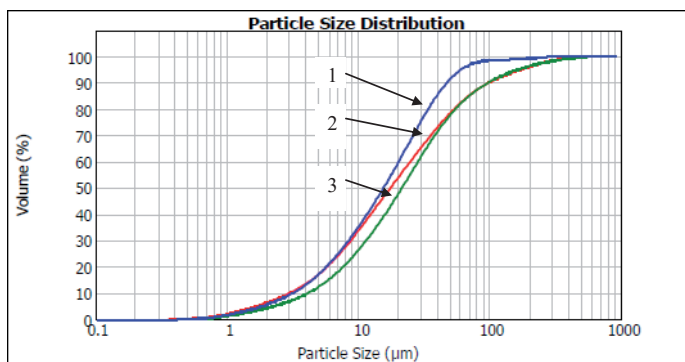
Chcąc uzyskać frakcję piaskową z szyb bezpiecznych należałoby przed poddaniem ich procesowi mielenia usunąć z nich folię zabezpieczającą.

Drobną frakcję 0/75 μm stłuczki, w celu zastosowania jej jako zamiennika cementu, uzyskano w wyniku jej przemiału w młynku normowym przez 40 i 150 minut. Na rysunku 2 i 3 przedstawiono krzywe składu ziarnowego po 40 i 150 minutach mielenia stłuczki.



- 1 – krzywa uziarnienia szkło kineskopowe po 40 min. mielenia
- 2 – krzywa uziarnienia szkło float po 40 min. mielenia
- 3 – krzywa uziarnienia szkło samochodowe po 40 min. mielenia
- 4 – krzywa uziarnienia szkło opakowaniowe brązowe po 40 min. mielenia
- 5 – krzywa uziarnienia szkło bezpieczne po 40 min. mielenia
- 6 – krzywa uziarnienia szkło opakowaniowe zielone po 40 min mielenia

Rys. 2. Skład ziarnowy stłuczki po 40 minutach mielenia



- 1 – Krzywa uziarnienia szkło bezpieczne po 150 min. mielenia
- 2 – Krzywa uziarnienia szkło float po 150 min. mielenia
- 3 – Krzywa uziarnienia szkło samochodowe po 150 min. mielenia

Rys. 3. Skład ziarnowy stłuczki po 150 minutach mielenia

W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny stłuczki różnego pochodzenia zastosowanej do badań.

Tabela 1. Skład chemiczny stłuczki

Składnik	Zawartość składnika [%]					
	Stłuczka kineskopowa	Stłuczka z szyb samochodowych	Stłuczka ze szkła bezpiecznego	Stłuczka ze szkła float	Stłuczka opakowaniowa brązowa	Stłuczka opakowaniowa zielona
SiO ₂	59,27	71,74	72,28	72,40	71,54	72,24
Al ₂ O ₃	2,33	0,75	0,59	0,88	1,66	1,71
Fe ₂ O ₃	1,18	1,40	0,67	0,49	1,68	1,13
CaO	1,46	9,30	9,61	9,23	10,22	10,22
MgO	0,61	3,73	4,03	3,44	1,64	0,94
SO ₃	0,05	0,27	0,26	0,21	0,06	0,09
K ₂ O	6,86	0,21	0,19	0,38	0,56	0,61
Na ₂ O	7,66	12,41	12,28	12,75	12,33	12,86
P ₂ O ₅	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01
TiO ₂	0,34	0,09	0,07	0,10	0,23	0,12
Mn ₂ O ₃	0,00	0,01	0,01	0,00	0,05	0,04
SrO	6,22	0,01	0,02	0,10	0,02	0,03
ZnO	0,27	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
ZrO ₂	1,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BaO	7,72	0,18	0,00	0,00	0,56	0,22
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,29
PbO	4,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NiO	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HfO ₂	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

4. Badania wskaźnika aktywności pucolanowej mielonej stłuczki szklanej

Badanie aktywności pucolanowej przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 450-1:2012 [19]. Przygotowano znormalizowane beleczy z zaprawy i przeprowadzono oznaczenie wytrzymałości na ściskanie zgodnie z PN-EN 196-1:2006 [20]. Jako zaprawę użyto 75% masy cementu porównawczego i 25% masy rozdrobnionej stłuczki szklanej. Wskaźnik aktywności został wyrażony jako stosunek w procentach wytrzymałości na ściskanie zaprawy wykonanej z użyciem stłuczki szklanej do wytrzymałości na ściskanie beleczy ze znormalizowanej zaprawy, będących w tym samym wieku, wykonanych z użyciem 100% cementu porównawczego.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki wytrzymałości znormalizowanej zaprawy wykonanej z cementu porównawczego oraz zapraw z udziałem różnego pochodzenia stłuczki szklanej po 28 i 90 dniach sezonowania wraz z wyliczonymi wskaźnikami aktywności puculanowej.

Tabela 2. Aktywność puculanowa stłuczki szklanej różnego pochodzenia

Rodzaj stłuczki	Wytrzymałość na ściskanie: zaprawy zawierającej 25 % stłuczki szklanej 75 % cementu porównawczego MPa		Wskaźnik aktywności puculanowej %	
	po 28 dniach	po 90 dniach	po 28 dniach	po 90 dniach
Znormalizowana zaprawa z cementu porównawczego	55,3	58,9		
Szkło okienne FLOAT po 40 minutach mielenia	40,8	51,8	74	88
Szkło okienne FLOAT po 150 minutach mielenia	46,2	57,7	84	98
Szkło bezpieczne laminowane po 40 minutach mielenia	41,3	51,6	75	88
Szkło bezpieczne laminowane po 150 minutach mielenia	51,3	58,8	93	100
Szkło kieszonkowe po 40 minutach mielenia	39,9	47,4	72	80
Szkło kieszonkowe po 150 minutach mielenia	46,4	55,6	84	94
Szkło kieszonkowe z wysianą frakcją 0/0,032	45,4	55,5	82	94
Szkło samochodowe po 40 minutach mielenia	43,8	54,0	79	92
Szkło samochodowe po 150 minutach mielenia	48,4	55,6	88	94
Szkło opakowaniowe zielone po 40 minutach mielenia	44,0	51,2	80	87
Szkło opakowaniowe zielone po 150 minutach mielenia	46,9	55,9	85	95%
Szkło opakowaniowe brązowe po 40 minutach mielenia	28,2	38,0	51	65
Szkło opakowaniowe brązowe po 150 minutach mielenia	42,7	52,0	77	88

Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że w większości przypadków otrzymane wartości wskaźnika aktywności puculanowej stłuczki szklanej są porównywalne z wynikami krzemionkowych popiołów lotnych w systematycznej kontroli produkcji który wynosi po 28 dniach około 83% a po 90 dniach 97%. Większość wyników spełnia

wymagania podane w normie PN-EN 450-1:2012, tj. wskaźnik aktywności po 28 dniach sezonowania powinien być większy niż 75% a po 90 dniach większy niż 85%. Wyniki dla szkła opakowaniowego brązowego oraz szkła kineskopowego po 40 minutach mielenia nie spełniają wymagań podanych w normie PN-EN 450-1:2012. Wskaźnik aktywności pucalonowej wzrasta wraz ze zwiększeniem czasu mielenia stłuczki szklanej. W przypadku próbki stłuczki kineskopowej mielonej przez 150 minut, odsianie frakcji 0/32 μm nie zwiększyło aktywności pucalonowej, uzyskano taki sam wskaźnik jak dla próbki nieodsianej o frakcji 0/75 μm .

5. Badania właściwości betonów z udziałem stłuczki szklanej

5.1. Metodyka przygotowania świeżych mieszanek betonowych

Do badań przyjęto receptury mieszanek betonowych o stałej ilości spoiwa (cement+mielona stłuczka szklana) wynoszącej 380 kg/m^3 , stałym punkcie piaskowym kruszywa równym 35%:65% oraz wskaźniku wodno-spoiwowym w/s równym 0,6.

Receptura betonu kontrolnego bez dodatku stłuczki szklanej przedstawiała się następująco:

– Piasek kwarcowy 0/2 mm	403 kg/m^3
– Kruszywo bazaltowe 2/8 mm	585 kg/m^3
– Kruszywo bazaltowe 8/16 mm	897 kg/m^3
– Cement CEM I 42,5R	380 kg/m^3
– Woda	228 kg/m^3

Badania właściwości świeżej mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu przeprowadzono dla różnych wariantów dodawania stłuczki szklanej do składu betonu. Stłuczkę szklaną różnego pochodzenia stosowano jako zamiennik cementu w ilościach: 10; 20 i 30% masy cementu oraz jako zamiennik kruszywa drobnego 0/2 mm. Kruszywo drobne 0/2 mm zastępowano w 100% stłuczką szklaną.

5.2. Właściwości świeżych mieszanek betonowych oraz stwardniałego betonu

Badane świeże mieszanki betonowe charakteryzowały się zbliżoną gęstością, taką samą jak w przypadku próby kontrolnej, wynoszącej około 2 500 kg/m^3 , niezależnie od rodzaju i ilości zastosowanej stłuczki szklanej. W przypadku stłuczki opakowaniowej brązowej i zielonej zanotowano nieznaczny wzrost napowietrzenia mieszanki betonowej w porównaniu z próbą kontrolną. W pozostałych przypadkach zawartość powietrza była porównywalna. Z przedstawionych danych w tabeli 3 wynika, że zwiększenie czasu mielenia stłuczki szklanej korzystnie wpłynęło na parametry reologiczne świeżej mieszanki betonowej, uzyskano konsystencję o klasę lub dwie wyższą przy takiej samej ilości wody zarobowej w składzie betonu.

W tabeli 3 oraz na rysunkach 4–6 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości betonów z udziałem różnego pochodzenia stłuczki szklanej. Na rysunku 4 przedstawiono graficznie otrzymane wyniki badań wytrzymałości betonów z zastosowaniem stłuczki szklanej jako zamiennika cementu w zależności od pochodzenia stłuczki, jej zawartości oraz czasu dojrzewania betonu. Przedstawione wyniki badań wskazują na to, że wytrzyma-

małość badanych betonów zależy od rodzaju zastosowanej stłuczki szklanej. W przypadku zastosowania stłuczki mielonej 40 minut jako zamiennika cementu, po 28 dniach dojrzewania, beton ze stłuczką opakowaniową brązową charakteryzował się największym spadkiem wytrzymałości o około 35%, przy ilości dodatku stłuczki 10 i 20% oraz o 40% przy ilości 50%, w porównaniu z próbą kontrolną. W pozostałych przypadkach spadek ten wyniósł maksymalnie 20%, przy dodatku 10% stłuczki, 35% przy dodatku 30% stłuczki. Uzyskane wyniki wytrzymałości korelują z określoną aktywnością pucolanową stłuczki szklanej różnego pochodzenia. Po 90 i 180 dniach dojrzewania obserwuje się znacznie mniejszy wpływ obecności stłuczki szklanej na obniżenie wytrzymałości betonów w porównaniu z próbą kontrolną. Świadczy to o intensyfikacji reaktywności pucolanowej stłuczki szklanej z czasem. W tym przypadku zaobserwowano spadek wytrzymałości do około 10%, w przypadku dodatku 10% stłuczki, przy 30% dodatku stłuczki o około 25% dla większości badanych próbek. W przypadku zastosowania szkła brązowego opakowaniowego obniżenie wytrzymałości było większe. We wszystkich przypadkach obniżenie wartości wytrzymałości zwiększało się wraz ze wzrostem zawartości stłuczki szklanej w składzie betonu.

Na rysunku 5 oraz w tabeli 4 pokazano wpływ dodatku stłuczki szklanej zastosowanej jako zamiennik kruszywa drobnego 0/2 mm na kształtowanie wytrzymałości betonu. Badania wykazały wpływ rodzaju zastosowanego szkła na parametr wytrzymałości na ściskanie betonu. Nieznacznie niższą wytrzymałość uzyskano dla betonu ze stłuczką opakowaniową. W przypadku stłuczki pochodzącej z szyb flot uzyskano porównywalne parametry wytrzymałości z próbą kontrolną.

Tabela 3. Właściwości betonu z mieloną 40 minut stłuczką różnego pochodzenia zastosowaną jako zamiennik cementu w ilościach 10; 20 i 30% masy

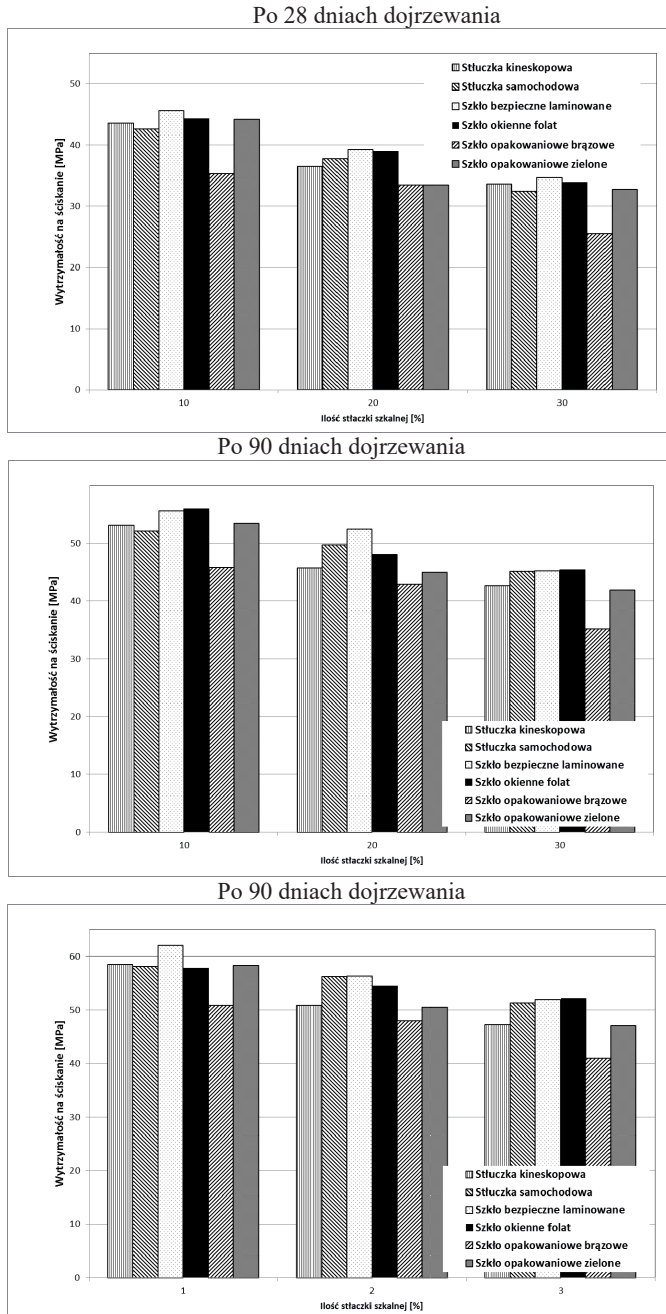
Oznaczenie prób	Gęstość świeżej mieszanki betonowej [kg/m ³]	Zawartość powietrza [%]	Konsystencja wg PN-EN 12350-5:2011	Wytrzymałość na ściskanie po dniach		
				28	90	180
			Klasa	[MPa]		
Próbka kontrolna	2 494	1,3	F4	52,4	59,9	63,6
Stłuczka mielona 40 minut						
Stłuczka kineskopowa 0/75 µm 10%	2 490	1,3	F4	43,6	53,1	58,6
Stłuczka kineskopowa 0/75 µm 20%	2 480	1,5	F4	36,5	45,7	50,9
Stłuczka kineskopowa 0/75 µm 30%	2 470	1,7	F5	33,6	42,6	47,3
Stłuczka kineskopowa 0/32 µm 30%	2 450	2,0	F4	35,3	44,3	51,0
Stłuczka samochodowa 0/75 µm 10%	2 480	1,6	F4	42,6	52,1	58,2
Stłuczka samochodowa 0/75 µm 20%	2 470	1,5	F4	37,8	49,7	56,3
Stłuczka samochodowa 0/75 µm 30%	2 460	1,5	F4	32,5	45,1	51,3

Tabela 3. Cd. Właściwości betonu z mieloną 40 minut słuczka różnego pochodzenia zastosowaną jako zamiennik cementu w ilościach 10; 20 i 30% masy

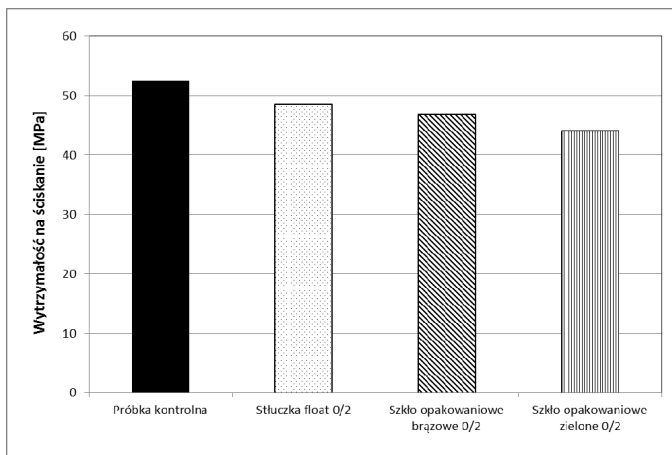
Oznaczenie prób	Gęstość świeżej mieszanki betonowej [kg/m ³]	Zawartość powietrza [%]	Konsystencja wg PN-EN 12350-5:2011	Wytrzymałość na ściskanie po dniach		
				28	90	180
			Klasa	[MPa]		
Szko bezpieczne laminowane 0/75 μ m 10%	2 500	1,3	F4	45,6	55,6	62,1
Szko bezpieczne laminowane 0/75 μ m 20%	2 484	1,2	F4	39,3	52,5	56,4
Szko bezpieczne laminowane 0/75 μ m 30%	2 460	1,5	F3	34,7	45,2	52,0
Szko okienne folat 0/75 μ m 10%	2 490	1,4	F4	44,3	55,9	57,9
Szko okienne folat 0/75 μ m 20%	2 480	1,3	F4	39,0	48,1	54,5
Szko okienne folat 0/75 μ m 30%	2 470	1,2	F4	33,9	45,4	52,2
Szko opakowaniowe brązowe 0/75 μ m 10%	2 450	2,2	F4	35,3	45,8	50,9
Szko opakowaniowe brązowe 0/75 μ m 20%	2 440	2,7	F5	33,5	42,9	48,1
Szko opakowaniowe brązowe 0/75 μ m 30%	2 410	3,2	F4	25,6	35,2	41,0
Szko opakowaniowe zielone 0/75 μ m 10%	2 470	1,8	F4	44,2	53,5	58,4
Szko opakowaniowe zielone 0/75 μ m 20%	2 430	2,8	F4	33,5	45,0	50,5
Szko opakowaniowe zielone 0/75 μ m 30%	2 440	2,4	F4	32,8	41,9	47,2

Tabela 4. Właściwości betonu ze słuczka różnego pochodzenia zastosowaną jako zamiennik kruszywa drobnego 0/2 mm

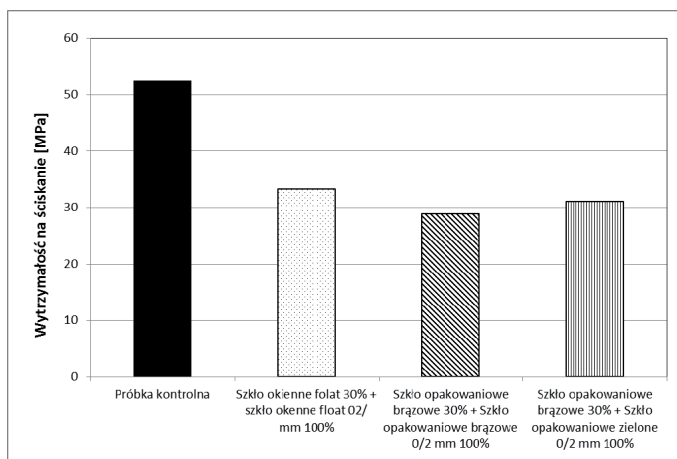
Oznaczenie prób	Gęstość świeżej mieszanki betonowej [kg/m ³]	Zawartość powietrza [%]	Konsystencja wg PN-EN 12350-5:2011	Wytrzymałość na ściskanie po dniach		
				28	90	180
			Klasa	[MPa]		
Próbka kontrolna	2 494	1,3	F4	52,4	59,9	63,6
Słuczka float 0/2	2 460	1,5	F4	48,5	56,1	63,4
Szko opakowaniowe brązowe 0/2	2 440	2,4	F4	46,8	56,8	59,8
Szko opakowaniowe zielone 0/2	2 460	1,9	F4	44,1	55,0	60,2



Rys. 4. Wytrzymałość betonów z mieloną 40 minut stłuczka szklana różnego pochodzenia zastosowaną jako zamiennik cementu



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania betonów ze słuczka różnego pochodzenia zastosowaną jako zamiennik kruszywa drobnego 0/2 mm



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania betonów ze słuczka różnego pochodzenia zastosowaną jako zamiennik cementu w ilości 30% masy oraz kruszywa drobnego 0/2 mm

W tabeli 5 przedstawiono uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie dla betonów, w których zastosowano słuczka szklaną jako zamiennik cementu w ilości 30% masy oraz jako zamiennik kruszywa drobnego 0/2 mm. Na rysunku 6 przedstawiono graficzne uzyskane wyniki wytrzymałości betonu po 28 dniach dojrzewania. Wytrzymałość próbek betonu z udziałem słuczki szklanej była o około 40% niższa niż w przypadku próby kontrolnej. Są to wartości porównywalne z wynikami uzyskanymi dla betonów, w których zastosowano słuczka szklaną jako zamiennik cementu w ilości 30% masy. Z uzyskanych wyników wytrzymałości po dłuższym czasie sezonowania próbek widać, że obniżenie

wytrzymałości w porównaniu z próbą kontrolną bez udziału stłuczki szklanej staje się mniejsza wraz z czasem.

Tabela 5. Właściwości betonu ze stłuczka różnego pochodzenia zastosowaną jako zamiennik cementu w ilości 30% masy oraz kruszywa drobnego 0/2 mm

Oznaczenie prób	Gęstość świeżej mieszanki betonowej [kg/m ³]	Zawartość powietrza [%]	Konsystencja wg PN-EN 12350-5:2011	Wytrzymałość na ściskanie po dniach		
				28	90	180
			Klasa	[MPa]		
Próbka kontrolna	2 494	1,3	F4	52,4	59,9	63,6
Szko okienne folat 30% + Szko okienne folat 0/2 mm 100%	2 440	1,6	F4	33,2	47,8	52,2
Szko opakowaniowe brązowe 30% + Szko opakowaniowe brązowe 0/2 mm 100%	2 420	3,1	F4	28,8	40,9	48,0
Szko opakowaniowe brązowe 30% + Szko opakowaniowe zielone 0/2 mm 100%	2 430	1,9	F4	31,0	42,4	50,7

6. Badania reaktywności alkalicznej

Ze względu na utrudnione stosowanie szkła i stłuczki szklanej do wytwarzania betonu z uwagi na to, że szkło jest niestabilne w środowisku zasadowym i może powodować destrukcję betonu w wyniku reakcji chemicznych ASR (alkali silica reaction) przebiegających pomiędzy szkłem a wodorotlenkiem sodu i potasu, przeprowadzono badania reaktywności alkalicznej zapraw, w których składzie zastosowano stłuczka szklaną. W tym celu zastosowano przyspieszoną metodę oceny ekspansji zapraw wg ASTM C1260 – 14 [20]. Wyniki pomiarów ekspansji badanych zapraw z udziałem mielonej stłuczki szklanej różnego pochodzenia zestawiono w tabeli 6 oraz 8–9. W tabelach podano wartości ekspansji zapraw przetrzymywanych w 1N roztworze NaOH w temperaturze 80°C.

Między innymi badaniom poddano zaprawy, w których stłuczka szklana stanowiła częściowy zamiennik cementu portlandzkiego. W ramach niniejszych badań przeprowadzono badania dla zaprawy kontrolnej bez udziału stłuczki szklanej oraz zapraw, w których skład wchodziła stłuczka szklana mielona przez 40 i 150 minut w ilości 30% masy cementu. W zaprawach tych zastosowano kruszywo bazaltowe o uziarnieniu zgodnym z wytycznymi normy ASTM C 1260 – 14.

W tabeli 6 przedstawiono wyniki badań dla zapraw ze zmieloną stłuczka szklaną mieloną przez 40 i 150 minut.

Z przedstawionych w tabeli 6 wyników badań widać, że zastąpienie cementu stłuczka szklaną kineskopową i z szyb samochodowych po 40 minutach mielenia, w ilości 30% masy cementu nieznacznie wpływa na wzrost ekspansji zapraw w porównaniu z zaprawą kontrolną bez stłuczki.

W przypadku stłuczki opakowaniowej zielonej wzrost ten jest większy, lecz nie powoduje przekroczenia kryterium odporności zaprawy na destrukcyjne oddziaływanie reakcji ASR, tj. wartości ekspansji 0,1% po 14 dniach ekspozycji w 1N NaOH. Wartości ekspansji poniżej 0,1% traktowane są jako brak niszczących oddziaływań reakcji ASR w betonie. Zastosowanie stłuczki pochodzenia opakowaniowego brązowego, szkła bezpiecznego laminowanego oraz szyb float powoduje wzrost ekspansji do wartości około 0,3%, wartość ta znacznie przewyższa kryterium oceny odporności 0,1% i może prowadzić do destrukcji betonu.

Tabela 6. Ekspansja zapraw z udziałem 30% stłuczki szklanej masy cementu

Próbka	Wydłużenie belek [%]		
	Czas ekspansji [dni]		
	2	6	14
Próba kontrolna	0,010	0,016	0,017
Po 40 minutach mielenia			
Stłuczka kineskopowa	0,008	0,010	0,034
Stłuczka samochodowa	0,006	0,007	0,035
Stłuczka ze szkła bezpiecznego	0,125	0,287	0,304
Stłuczka float	0,125	0,290	0,303
Stłuczka opakowaniowa brązowa	0,124	0,285	0,299
Stłuczka opakowaniowa zielona	0,023	0,056	0,073
Po 150 minutach mielenia			
Próba kontrolna	0,010	0,016	0,017
Stłuczka kineskopowa	0,005	0,005	0,018
Stłuczka samochodowa	0,001	0,003	0,011
Stłuczka ze szkła bezpiecznego	0,002	0,005	0,01
Stłuczka float	0,018	0,05	0,099
Stłuczka opakowaniowa brązowa	0,017	0,048	0,096
Stłuczka opakowaniowa zielona	0,004	0,009	0,034

Uzyskane wyniki badań świadczą o tym, że wydłużenie czasu mielenia stłuczki szklanej, niezależnie od pochodzenia, do 150 minut korzystnie wpływa na kształtowanie reakcji ASR. Zaprawy, które w swoim składzie zawierały jako zamiennik cementu stłuczkę mieloną przez 150 minut w ilości 30% charakteryzowały się znacznie mniejszą wartością ekspansji niż w przypadku analogicznych zapraw ze stłuczką mieloną przez 40 minut. Dla zapraw ze stłuczką pochodzenia opakowaniowego brązowego, szkła bezpiecznego laminowanego oraz szyb float, uzyskano obniżenie wartości ekspansji poniżej 0,1%, czyli uzyskano wynik wskazujący na brak niszczących oddziaływań reakcji ASR w betonie. Dla zapraw zawierających stłuczkę samochodową oraz ze szkła bezpiecznego laminowanego, uzyskano obniżenie ekspansji zapraw, w porównaniu do zaprawy kontrolnej bez

stłuczki szklanej. Wartości ekspansji dla tych zapraw wynoszą około 0,01 %. W przypadku stłuczki kineskopowej ekspansja po 14 dniach ekspozycji zapraw w roztworze 1N NaOH jest taka sama jak dla zaprawy porównawczej. W przypadku pozostałych rodzaj stłuczki ekspansja zapraw jest poniżej 0,1%.

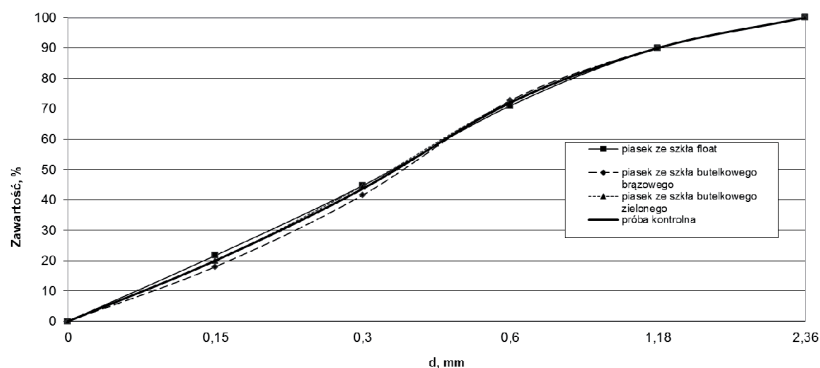
W tabeli 8 przedstawiono wyniki ekspansji zapraw z udziałem stłuczki szklanej zastosowanej jako zamiennik kruszywa drobnego o frakcji 0,15/2,36 mm. Frakcję tą zastąpiono w 100% stłuczką szklaną pochodzenia opakowaniowego oraz z okien float.

Z uwagi na trudności w przygotowaniu wymaganego normą ASTM C 1260-14 uziarnienia badanej stłuczki szklanej o frakcji 0,15/2,36 mm zastosowano odstępstwo od normy w zakresie składu ziarnowego. Brakującą frakcję 2,36/4,75 mm stłuczki zastąpiono kruszywem bazaltowym. Skład ziarnowy kruszywa zastosowanego w badaniach przedstawiono w tabeli 7 i na rysunku 7.

Uzyskane wyniki świadczą o tym, że w przypadku wszystkich zapraw ekspansja kształtuje się poniżej 0,1% i jest porównywalna do zaprawy kontrolnej bez udziału stłuczki.

Tabela 7. Skład ziarnowy kruszywa drobnego o frakcji (0,15/2,36) mm zastosowany do badania reakcji ASR zapraw z udziałem stłuczki szklanej jako zamiennika kruszywa drobnego

Frakcja[mm]	Zawartość frakcji [%]
2,36/4,75 (kruszywo bazaltowe)	10
1,18–2,36	18
0,6–1,18	28,3
0,3–0,6	23,7
0,15–0,3	20



Rys. 7. Uziarnienie kruszywa drobnego o frakcji 0,15/2,36 mm dla próby kontrolnej, do badania reakcji ASR, na tle uziarnienia uzyskanego ze stłuczki szklanej stosowanej jako zamiennik piasku

Tabela 8. Ekspansja zapraw w obecności stłuczki szklanej zastosowanej jako zamiennik piasku 0,150/2,36 mm

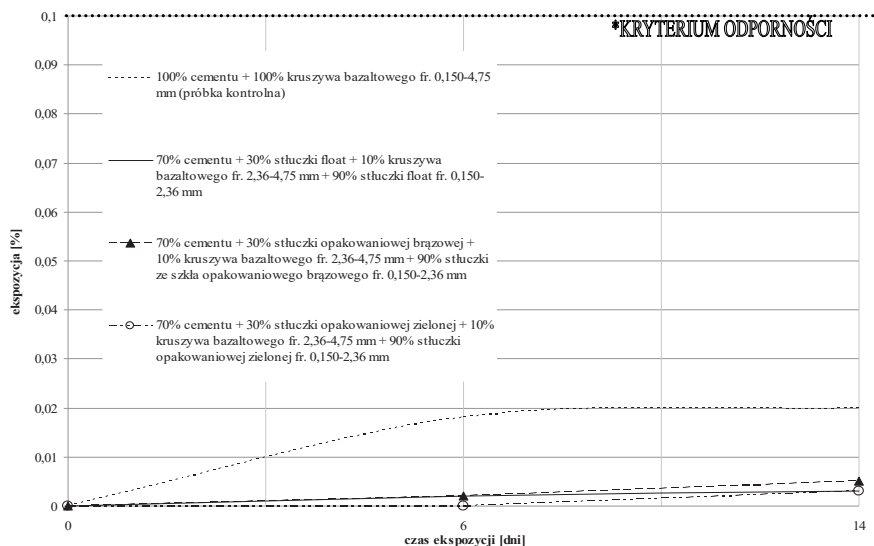
Próbka	Wydłużenie belek [%]		
	Czas ekspansji [dni]		
	2	6	14
Próba kontrolna	0,010	0,018	0,020
Stłuczka float	0,005	0,006	0,021
Stłuczka opakowaniowa brązowa	0,003	0,008	0,036
Stłuczka opakowaniowa zielona	0,004	0,006	0,024

W tabeli 9 oraz na rysunku 8 przedstawiono wyniki badań reakcji ASR zapraw, w których stłuczka szklana stanowiła zarówno zamiennik cementu, jak i kruszywa drobnego o frakcji (0,15/2,36) mm. Do badań zastosowano stłuczkę po 150 minutach mielenia jako zamiennik cementu. Zastosowano ją w ilości 30% w stosunku do masy cementu. Frakcja (0,15/2,36) mm kruszywa została zastąpiona stłuczką w 100%. W tym przypadku, przedmiotem badań była stłuczka okienna float, stłuczka opakowaniowa zielona oraz brązowa. Również w tym przypadku zastosowano opisane powyżej odstępstwo od normy ASTM C 1260-14 w zakresie uziarnienia.

Z przedstawionych danych wynika, że równoczesne zastąpienie cementu i kruszywa stłuczką szklaną jest najkorzystniejszym wariantem spośród przebadanych zapraw. W przypadku takiego składu zaprawy, niezależnie od pochodzenia stłuczki, okiennej float czy też opakowaniowej zielonej czy brązowej charakteryzowały się bardzo małą ekspansją poniżej 0,005% (rys. 8).

Tabela 9. Ekspansja zapraw w obecności stłuczki szklanej jako zamiennik cementu i frakcji piaskowej (0,15-2,36) mm

Próbka	Wydłużenie belek [%]		
	Czas ekspansji [dni]		
	2	6	14
Próba kontrolna	0,001	0,018	0,020
Stłuczka float	0,001	0,002	0,003
Stłuczka opakowaniowa brązowa	0,001	0,002	0,005
Stłuczka opakowaniowa zielona	0,000	0,000	0,003



* Kryterium odporności zaprawy na destrukcyjne oddziaływanie reakcji ASR wg Normy ASTM C 1260 - 01

Rys. 8. Ekspansja zapraw w obecności mielonej stłuczki szklanej jako zamiennik cementu i piasku fr. (0,15/2,36) mm w 1 N NaOH w temperaturze 80°C

7. Podsumowanie

Otrzymane wartości wskaźnika aktywności pucolanowej badanych próbek stłuczki szklanej w większości przypadków są porównywalne z wynikami aktywności pucolanowej krzemionkowych popiołów lotnych. Jedynie w przypadku szkła opakowaniowego brązowego oraz szkła kineskopowego po 40 minutach mielenia nie otrzymano wymaganego wskaźnika aktywności pucolanowej wskazanego w normie PN-EN 450-1. Wydłużenie czasu mielenia powoduje wzrost wskaźnika aktywności pucolanowej. Po 150 minutach mielenia dla szkła kineskopowego i opakowaniowego brązowego uzyskano wymagane wskaźniki aktywności pucolanowej.

Przeprowadzone badania reakcji alkalicznej metodą przyspieszoną w większości przypadków wykazały brak ekspansji zapraw w 1N NaOH. Przekroczenie kryterium otrzymano w przypadku 30% dodatku stłuczki pochodzenia opakowaniowego brązowego, szkła bezpiecznego laminowanego oraz szyb float po 40 minutach mielenia. Wydłużenie czasu mielenia stłuczki do 150 minut bardzo korzystnie wpłynęło na kształtowanie reakcji ASR. Wszystkie badane próbki wykazały ekspansję poniżej 0,1%. Zaprawy, w których stłuczkę szklaną zastosowano jako zamiennik kruszywa drobnego 0/2 mm wykazywały ekspansję poniżej 0,1%. Równoczesne zastąpienie cementu i kruszywa stłuczką szklaną jest najkorzystniejszym wariantem spośród przebadanych zapraw. W przypadku takiego składu zaprawy, niezależnie od pochodzenia stłuczki zaprawy charakteryzowały się bardzo małą ekspansją poniżej 0,005%. Stłuczka szklana niezależnie od pochodzenia, zastosowana jako zamiennik cementu w ilości od 10–30% masy, korzystnie kształtuje re-

akcję alkaliczną ASR. Zastosowanie stłuczki szklanej efektywnie obniża ekspansję zapraw wykazujących ekspansję w 1N NaOH.

Przeprowadzone badania wytrzymałości na ściskanie betonów, w których zastosowano stłuczka szklaną jako zamiennik cementu i/lub kruszywa drobnego 0/2 mm wykazały, że w przypadku zastosowania stłuczki szklanej jako zamiennika cementu po 28 dniach sezonowania betonu otrzymuje się obniżenie wytrzymałości w porównaniu z próbą kontrolną. Po 90 i 180 dniach sezonowania obserwuje się znacznie mniejszy wpływ obecności stłuczki szklanej na obniżenie wytrzymałość betonów. Świadczy to o intensyfikacji reaktywności puculanowej stłuczki szklanej z czasem. Uzyskane wyniki wytrzymałości korelują z określoną aktywnością puculanową stłuczki szklanej różnego pochodzenia. W przypadku zastosowania stłuczki szklanej jako zamiennika kruszywa drobnego, badania wykazały wpływ rodzaju zastosowanego szkła na wytrzymałość na ściskanie betonu. Najniższą wytrzymałość uzyskano dla betonu ze stłuczka opakowaniową. W przypadku stłuczki pochodzącej z szyb flot uzyskano dobre parametry wytrzymałości, porównywalne z próbą kontrolną.

Przeprowadzone wstępne badania, przedstawione w niniejszej pracy wskazują na możliwość zastosowania stłuczki szklanej do wytwarzania betonów.

Podjęte zagadnienie wymaga podjęcia dalszych badań długoterminowych reakcji ASR w celu pełnej oceny możliwości zastosowania stłuczki szklanej do wytwarzania betonów.

Literatura

- [1] Kłopotek B.: *Cz.III. Umieszkodliwianie*, Recykling 2011, nr 5,
- [2] Kuśnierz A.: *Recykling szkła*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych 2010, nr 6,
- [3] Nowak A., Tora B., Tejchman Z., Peszko B.: *Badanie możliwości utylizacji pozostałości po recyklingu odpadów szklanych w produkcji kruszywa piaskowego*, Górnictwo i Geoinżynieria 2010, rok 34, zeszyt 4/1, 203–206,
- [4] Pawłowski A.: *Możliwości wykorzystania stłuczki szklanej w inżynierii geotechnicznej*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej 2006, Zeszyt 28, 259–268,
- [5] Golek Ł., Kapelusznia E.: *Zastosowanie stłuczki szklanej i popiołów fluidalnych do produkcji spoiw*, Świat Szkła 2010, nr 5, 42–44,
- [6] Sordoń-Kulibaba B.: *Recykling odpadów szklanych*, Świat Szkła 2008, nr 7-8 , 46–49,
- [7] Gebel R., Synowiec B.: *Badanie możliwości zastosowania odpadowego szkła kineskopowego do produkcji szklito topników i barwnych kształtek ceramicznych*, Materiały Ceramiczne 2012, nr 2, 234–238,
- [8] Pawłowski A.: *Możliwości wykorzystania stłuczki szklanej w inżynierii geotechnicznej*, Zeszyty naukowe Politechniki Białostockiej 2006, Budownictwo – Zeszyt 28, 259–268,
- [9] Jursza F.: *Kompleksowa gospodarka odpadami w gminie*, Warszawa 1998,
- [10] Cienińska M.: *Szkła odpadowe do produkcji specjalnych materiałów porowatych*, Szkło i Ceramika 2007, Rocznik 58, 9–13,
- [11] ICER (Industry Council for Electronic Equipment Recycling) *Materials recovery from waste cathode ray tubes (CRTs)* Project code: GLA15-006,
- [12] Carvalho S., L. E. Murr, Roy M. Arrowood: *Glastic Composite Prototypes: A Materials Alternative for Recycling Plastic and Glass Waste*, Advanced Performance Materials 1998, Volume 5, Issue 3, pp 159–169,
- [13] Andreola F., Barbieria L., Corradi A., Lancellotti I.: *CTR glass state of the art. A case study: Recycling In ceramic Glazer*, Journal of the European Ceramic Society 2006, 27, 1623–1629,
- [14] Shayan A., Xu A.: *Value-added utilisation of waste glass In concrete*, Cement and Concrete Research 2004, no 34, 81–89,
- [15] Deja J., Golek E., Kołodziej Ł.: *Zastosowanie stłuczki szklanej w produkcji spoiw*, CWB-6,2011, 349–354,
- [16] Deja J., Golek E., Kołodziej Ł., Różycka A.: *Właściwości zaczynów z klinkieru portlandzkiego z dodatkiem szkła przemysłowych*, Dni Betonu 2010,
- [17] Soroushian P.: *Towards Broad use of recycled glass concrete on MSU Campus, Innovation on Sustainability Seed Grant*, Michigan State University 2012,

- [18] Ling Tc, Poon CS, Lam WS, Chan TP, Fung KK: *Utilization of recycled cathode ray tubes glass In cement mortar for X-ray radiation-shielding applications*, Journal of Hazardous Materials 2012, 199–200, 321–327,
- [19] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności,
- [20] PN-EN 196-1:2006 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości,
- [21] ASTM C1260 – 14 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregate (Mortar-Bar Method).