

WSTĘPNA OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ODPADÓW SZKLANYCH POCHODZĄCYCH Z WYEKSPLOATOWANYCH ŚWIETŁÓWEK JAKO KRUSZYWA DO BETONÓW CEMENTOWYCH

W pracy przedstawiono wstępne analizy możliwości wykorzystania odpadów szklanych pochodzących z wyeksploatowanych świetlówek, jako kruszywa do betonów cementowych. Materiał badawczy pozyskano z firmy utylizującej odpady elektryczne. Szkło ze wstępnie posegregowanych elementów oświetleniowych przetransportowano do laboratorium i pokruszono w młódcierzu stalowym. W ten sposób uzyskane kruszywo poddano podstawowym badaniom, jakie wykonuje się dla kruszyw tradycyjnie stosowanych w budownictwie. Zbadano gęstość właściwą kruszywa, gęstość objętościową, nasiąkliwość, oceniono kształt ziaren oraz typ tekstury. W kolejnym etapie prac badawczych wykonano mieszankę betonową, w której jako substytut 25% kruszywa żwirowego zastosowano kruszywo z pokruszonych świetlówek. Zbadano wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie tak powstałego betonu. Analiza wyników badań wykazała, że pokruszone szkło z wyeksploatowanych świetlówek może być potencjalnie wykorzystywane, jako kruszywo do betonów cementowych.

WSTĘP

Wtórne użycie wielu wyeksploatowanych wyrobów jest możliwe z punktu widzenia technicznego, mimo to wiele metod i proponowanych rozwiązań napotyka na ograniczenia ekonomiczne. W przypadkach, w których surowce do produkcji nowych wyrobów są łatwo dostępne, a ich pozyskanie nie jest kosztowne recykling z punktu widzenia przedsiębiorstw jest zbędny. Przykładem takich wyrobów są szklane materiały oświetleniowe. Odzysk materiału szklanego w tym przypadku jest trudny i kosztowny, a transport niewielkich ilości do hut staje się zupełnie nieuzasadniony ekonomicznie. W tego typu przypadkach staje się, więc konieczne poszukiwanie nowych - lokalnych metod recyklingu materii odpadowej. Jednym z proponowanych rozwiązań jest włączenie recyklatu do innej gałęzi produkcyjnej np. wytwarzania betonów cementowych. Możliwość włączenia odpadu do miejscowej produkcji kompozytów niostaby głównie korzyści ekologiczne. Celem byłoby zmniejszenie ilości odpadów deponowanych na wysypiskach oraz likwidacja nielegalnego procederu wyrzucania odpadów w miejscach do tego nie przeznaczonych.

Użycie szkła, jako dodatku do kompozytów cementowych jest zagadnieniem analizowanym przez wiele zespołów badawczych. Ze względu na formę, w jakiej szkło wprowadzane jest do mieszanki badania obierają kilka kierunków. Najstarszym z proponowanych rozwiązań jest użycie szkła w formie włókien [1-4]. Dodatek tego typu pozytywnie wpływa na parametry otrzymywanych betonów. Betony z dodatkiem włókien posiadają wyższe parametry wytrzymałościowe, i są bardziej odporne na czynniki środowiskowe takie jak wilgoć, nasłonecznienie czy procesy rozmrażania i zamarzania. Działalność ta nie jest jednak prowadzona lokalnie i wymaga dużych nakładów energetycznych na przetopienie recyklatu.

Kolejnym proponowanym rozwiązaniem jest wprowadzenie szkła do betonów w postaci pyłów [5-7]. Ten typ dodatku również pozytywnie wpływa na kompozyty cementowe. Rozdrobnione odpady powodują lepszą urabialność betonu, a po związaniu kompozyt

ma wyższe wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie niż kompozyty wykonane bez jego udziału.

Stosunkowo nową ideą jest wprowadzenie odpadów nieorganicznych do mieszanek cementowych jako substytutu kruszywa grubego. Prace badawcze prowadzone zarówno na ziarnach szkła [8-10], jak i odpadów ceramicznych [11,12] potwierdzają możliwość wprowadzenia odpadu w takiej postaci. Przygotowanie tego typu kruszywa jest najbardziej korzystne z punktu widzenia ekonomicznego. Nie wymaga ono dużych pokładów energii na przetop jak to dzieje się w przypadku włókien, czy na kruszenie w przypadku pyłów. Rozdrobnienie szkła do formy ziaren grubych jest czynnością prostą i niewymagającą dużych nakładów energetycznych. Jednocześnie jest możliwe do zrealizowania w standardowych kruszarkach, z których popularnie korzystają betoniarnie.

W niniejszej pracy przedstawiono propozycję wykorzystania odpadu szklanego pochodzącego z wyeksploatowanych świetlówek, jako substytutu kruszywa uziarnienia 4-8mm. Materiał szklany pokruszono w młódcierzu i wytworzono z niego kruszywo. Wykonano podstawowe badania, jakie prowadzi się dla popularnie stosowanych kruszyw do betonów. Zbadano gęstość właściwą kruszywa, gęstość objętościową, nasiąkliwość, oceniono kształt ziaren oraz typ tekstury ziaren. W kolejnym etapie prac badawczych wykonano mieszankę betonową, w której jako substytut 25% kruszywa żwirowego zastosowano kruszywo z pokruszonych świetlówek. Zbadano wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie tak powstałego betonu. Analiza wyników badań wykazała, że pokruszone szkło z wyeksploatowanych świetlówek może być potencjalnie wykorzystywane, jako kruszywo do betonów cementowych. Podobnych badań prowadzonych na kruszywie z wyeksploatowanych świetlówek w literaturze nie napotkano.

1. OPIS BADAŃ

1.1. Surowce

Materiał szklany pozyskano z firmy zajmującej się utylizacją odpadów elektrycznych. Wyeksploatowane świetlówki pozbawiono

oprzyrządowania, przy czym podczas procesu tego ulegały one uszkodzeniom. Materiał ostatecznie pobrany do badań stanowiły połamane rury szklane. Rury przełożono do pojemnika plastikowego i przetransportowano do laboratorium. Materiał badawczy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Rury z wyeksploatowanych świetlówek pobrane do badań

Jako cementu do betonu użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5N – SR 3/NA. Cement ten cechuje się stabilnymi parametrami fizykochemicznymi odpowiednim czasem wiązania, wysokimi parametrami wytrzymałości wczesnej i końcowej, niską zawartością alkaliów oraz wysoką odpornością na agresywne czynniki chemiczne. Dzięki tym zaletom popularnie wykorzystywany jest w produkcji towarowej mieszanek betonowych. W tab. 1 przedstawiono parametry fizykochemiczne zastosowanego cementu.

Tab. 1. Parametry fizykochemiczne cementu CEM I 42,5N – SR 3/NA

Cecha	Jednostka	Wynik średni
Początek wiązania	[min]	233
Koniec wiązania	[min]	291
Wodozjadność	[%]	27,5
Stalność objętości	[mm]	1,1
Powierzchnia właściwa	[cm ² /g]	3688
Wytrzymałość na ściskanie: po 2 dniach	[MPa]	23,9
Wytrzymałość na ściskanie: po 28 dniach	[MPa]	55,9

Jako domieszki uplastyczniającej użyto CHRYSO Omega 132. Jest to domieszka nowej generacji, redukująca ilość wody - uplastyczniająca. Domieszka ta wytwarzana jest z wykorzystaniem najnowszej technologii polimerów hybrydowych. Technologia ta oparta na syntezie molekuł pozwala domieszce na silną redukcję ilości wody zarobowej, długotrwałe utrzymanie konsystencji mieszanki betonowej oraz jednorodność i spoiłość mieszanki betonowej. Podstawowe parametry techniczne domieszki przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Podstawowe właściwości domieszki: CHRYSO Omega 132

Właściwość	Opis
Postać	Jednorodna ciecz
Barwa	Brazowa
Gęstość (20°C)	1,075 +/- 0,02 [kg/dm ³]
pH	5 +/- 1
Zawartość jonów Cl-	do 0,1 [%]
Zawartość alkaliów w przeliczeniu na Na ₂ O	do 2,0 [%]

1.2. Metodyka badań

Do przygotowania kruszywa zastosowano metalowy moździerz oraz ubijak. Szklane rury umieszczono w moździerzu i ręcznie ugniatano je do momentu, w którym powstałe ziarna posiadały rozmiar mniejszy niż 8mm. Ze względu na niewielki wymiar ścianek

rur proces kruszenia był prosty i nie wymagał wielkich nakładów siłowych. Uzyskane w wymieniony sposób kruszywo przedstawiono na rys. 2. Na tak przygotowanym kruszynie przeprowadzono wybrane badania jakie wykonuje się w laboratoriach dla kruszyw tradycyjnie używanych przy produkcji kompozytów betonowych [13,14].



Rys. 2. Kruszywo z wyeksploatowanych świetlówek

Do wyznaczenia gęstości właściwej kruszywa zastosowano metodę normową wg PN-EN1097-7 [16]. Zastosowane do badania kruszywo rozdrobniono do formy pyłu. Stanowisko badawcze wyposażone zostało w: piknometr o objętości 500 ml, wagę, suszarkę laboratoryjną, termometr, pompę próżniową oraz sito badawcze o oczku 0,125 mm. Gęstość właściwą obliczono jako stosunek masy rozdrobnionego kruszywa do jego objętości.

Gęstość pozorną oraz nasiąkliwość kruszywa zbadano metodą normową wg PN-EN 1097-6 [15]. Stanowisko badań wyposażone w suszarkę laboratoryjną, wagę, łaźnię wodną, sita laboratoryjne, tace do suszenia, ściereczki chłonnące wilgoć, stoper oraz formę z ubijakiem. Gęstość pozorną kruszywa obliczono, jako stosunek masy kruszywa do jego objętości z uwzględnieniem wolnych przestrzeni w jego objętości. Nasiąkliwość kruszywa obliczona została jako ilość wody jaką może wchłonąć kruszywo w stosunku do masy suchego kruszywa wyrażoną w procentach.

Do oceny kształtu ziaren wykorzystano metodę porównawczą wg. [13]. Zmierzone długość, szerokość oraz grubość ziaren reprezentatywnych, których występowanie było najbardziej liczne. Na zasadzie porównania długości i szerokości, które były trzy krotnie większe niż grubość, oceniono, że są to ziarna płaskie. Ocenę typu tekstury ziaren dokonano na podstawie [17]. Strukturę oceniono jako gładką.

2. WYNIKI BADAŃ

W tab. 3. przedstawiono wyniki badań oraz zestawiono je z wynikami literaturowymi zgodnie z [13,17] dla innych popularnych kruszyw stosowanych do betonów – piaskowo-żwirowych. Tabelę uzupełniono też literaturowymi parametrami podstawowymi dla szkła.

Tab. 3. Wyniki badań kruszywa z wyeksploatowanych świetlówek w porównaniu z wynikami badań dla kruszywa tradycyjnego piaskowo-żwirowego [13,17]

Rodzaj kruszywa/ właściwość	Jednostka	Kruszywo tradycyjne: piasek, żwir	Kruszywo z wyeksploatowanych świetlówek
Gęstość właściwa	[kg/dm ³]	2,65	2,63
Gęstość objętościowa	[kg/dm ³]	2,20	2,62
Wytrzymałość na ściskanie	[MPa]	33	650
Moduł sprężystości	10 ² [MPa]	330	700
Nasiąkliwość	[%]	2,1	0,1
Kształt ziaren /Typ tekstury	-	owalne / gładka	płaskie / gładka

Analiza porównawcza parametrów uzyskanych dla kruszywa szklanego z parametrami kruszywa tradycyjnego zwraca szczególną uwagę na niską nasiąkliwość kruszywa szklanego jak i na wysokie parametry wytrzymałościowe materiału szklanego. Obie te cechy są bardzo korzystne z punktu widzenia użycia go do betonów. Niska nasiąkliwość kruszywa sprawia, że kompozyt betonowy jest mniej nasiąkliwy, przez co odporny jest bardziej na działanie mrozu. Wysoka wytrzymałość kruszywa w efekcie wpływa na wyższą wytrzymałość otrzymanego z niego kompozytu. Niepokojącą cechą jest natomiast kształt ziaren. Ilość ziaren płaskich w stosie okruszowym kruszywa nie powinna być wysoka.

W celu wstępnej oceny możliwości zastosowania odpadów szklanych z wyeksploatowanych świetlówek jako kruszywa do betonów wytworzono mieszankę betonową z jego udziałem. Założono, że 25% ilości kruszywa użytego do składu wyjściowego stanowić będzie substytut kruszywa w formie odpadów szklanych. Skład betonu ustalono jak dla betonów tradycyjnych. Założono przewidywaną wytrzymałość betonu równą 15MPa. Ostateczny skład mieszanki zawierającej szkło odpadowe przedstawiono w tab. 4.

Tab. 4. Skład betonu zawierającego kruszywo ze świetlówek

Składnik	Ilość [kg/m ³]
Cement CEM I 42,5N – SR 3/NA	250
Woda	175
Piasek 0/2	388
Żwir 2/8	536
Kruszywo ze świetlówek 0/8	924
Domieszka CHRYSO Omega 132	2,52

Jako że kruszywo użyte do wytworzenia mieszanki było mniejsze niż 8mm próbki betonowe przygotowano w formie beleczek o wymiarach 4x4x16cm. Beton umieszczono w formach i poddano pielęgnacji wilgotnościowej w zamkniętym naczyniu wypełnionym częściowo wodą. Po trzech dniach od zaformowania próbki wyjęto z form przy czym pozostawiono je w tych samych warunkach do momentu badania. Badanie prowadzono po 28 dniach od zaformowania wg. [13,17,18]. Zbadano wytrzymałość betonu na rozciąganie w schemacie trójpunktowym oraz wytrzymałość na ściskanie. Wyniki badań przedstawiono w tab. 5.

Tab. 5. Wyniki badań parametrów wytrzymałościowych betonu z kruszywem ze skruszonych świetlówek

Numer próbki	Wytrzymałość i-tej próbki, [MPa]	Wytrzymałość średnia, [MPa]	Odchylenie standardowe, [MPa]	Wskaźnik zmienności [%]
Wytrzymałość na rozciąganie				
1	4,67	4,73	0,23	4,81
2	5,01			
3	4,70			
4	4,42			
5	4,56			
6	4,95			
7	5,26			
8	4,60			
9	4,42			
Wytrzymałość na ściskanie				
1	18,72	18,05	1,42	7,85
2	16,52			
3	18,92			
4	15,25			
5	20,36			
6	16,02			
7	18,67			
8	19,95			
9	18,03			

PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Wyniki badań wykazały, że beton w którym 25% kruszywa tradycyjnego zastąpiono kruszywem szklanym posiadał zadowalające parametry wytrzymałościowe. Szczególną cechą, na którą zwrócono uwagę była korelacja parametru wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości na rozciąganie. Korelacja ta dla betonów tradycyjnych wynosiła około 1:10 natomiast dla betonu z kruszywem ze świetlówek wynosiła 1:3,8. Może to świadczyć o tym, że użycie kruszywa w formie odpadów szklanych może wpływać korzystnie na wytrzymałość betonu na rozciąganie. Cechą niekorzystną był natomiast wysoki wskaźnik zmienności wynoszący dla badania wytrzymałości na rozciąganie 4,81% natomiast dla badania wytrzymałości na ściskanie 7,85%. Cecha ta świadczyła o niejednorodności wytworzonego betonu w obrębie badanych próbek.

Przeprowadzone badania wykazały, że:

1. Z wyeksploatowanych świetlówek istnieje możliwość odzyskania materiału szklanego.
2. Ze szkła z wyeksploatowanych świetlówek można wytworzyć kruszywo do betonu.
3. Pozyskane w wymieniony sposób kruszywo cechują bardzo niską nasiąkliwość oraz wysoka wytrzymałość materiału szklanego, które to cechy mogą wpływać pozytywnie na właściwości kompozytów otrzymanych z ich udziałem.
4. Wysoka zawartość ziaren płaskich może być przyczyną obniżenia parametrów wytrzymałościowych betonów z kruszywem szklanym.
5. Pilotażowe badania betonu zawierającego kruszywo ze świetlówek dowodzą, że posiada on zadowalające parametry wytrzymałościowe.
6. Beton zawierający kruszywo szklane posiada wysoką wartość na rozciąganie w porównaniu z wartością wytrzymałości na ściskanie.

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych można stwierdzić, że kruszywo otrzymane ze świetlówek może być stosowane do betonów. W celu wprowadzenia proponowanego rozwiązania do zastosowań przemysłowych należy prowadzić dalsze prace badawcze w tym obszarze.

BIBLIOGRAFIA

1. Ahmad S., Umar A., Masood A., *Properties of Normal Concrete, Self-compacting Concrete and Glass Fibre-reinforced Self-compacting Concrete: An Experimental Study*, Procedia Engineering, Volume 173, 2017, pp. 807-813.
2. Dehghan A., Peterson K., Shvarzman A., *Recycled glass fiber reinforced polymer additions to Portland cement concrete*, Construction and Building Materials, Volume 146, 15 August 2017, pp. 238-250.
3. Sivakumar V.R., Kavitha O.R., Prince Arulraj G., Srisanthig V.G., *An experimental study on combined effects of glass fiber and Metakaolin on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete*, Applied Clay Science, Volume 147, October 2017, pp. 123-127.
4. Sathanandam T., Awoyera P., Vijayan V., Sathishkumar K., *Low carbon building: Experimental insight on the use of fly ash and glass fibre for making geopolymers concrete*. Sustainable Environment Research, Volume 27, Issue 3, May 2017, pp. 146-153.
5. Soliman N.A., Tagnit-Hamou A., *Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards eco-friendly concrete*, Construction and Building Materials, Volume 125, 30 October 2016, pp. 600-612.

6. Omran A., Harbec D., Tagnit-Hamou A., Gagne R., *Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study*, Construction and Building Materials, Volume 133, 15 February 2017, pp. 450-458.
7. Ahmed F., Omran, Etienne D.-Morin, Harbec D., Tagnit-Hamou A., *Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications*, Construction and Building Materials, Volume 135, 15 March 2017, pp. 43-58.
8. Hongjian Du, Kiang Hwee Tan, *Properties of high volume glass powder concrete*, Cement and Concrete Composites, Volume 75, January 2017, pp. 22-29.
9. Omran A., Tagnit-Hamou A., *Performance of glass-powder concrete in field applications*, Construction and Building Materials, Volume 109, 15 April 2016, pp. 84-95.
10. Ali A. Aliabdo, Abd Elmoaty M. Abd Elmoaty, Ahmed Y. Aboshama; *Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete*, Construction and Building Materials, Volume 124, 15 October 2016, pp. 866-877.
11. Halicka A., Ogrodnik P., Zegardło, B., *Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate*, Construction and Building Materials, 2013, 48, pp. 295-305.
12. Zegardło B., Szelağ M., Ogrodnik P., *Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes–The method of production and the interfacial transition zone*, Construction and Building Materials, Vol. 122, 2016, pp. 736–742.
13. Jamroży Z., *Beton i jego technologie* (Concrete and its technologies), Wydawnictwo Naukowe PWN, 2006.
14. EN 12620:2002. Aggregate for concrete.
15. EN 1097-6: 2011. Tests for mechanical and physical properties of aggregate, Part 6: Determination of particle density and water absorption.
16. EN 1097-7:2001. Tests for mechanical and physical properties of aggregate, Part 7: Determination of particle density of filler – Pycnometer method.
17. Neville A.M., *Properties of concrete*. 1995.
18. EN 12390-3:2006. Testing hardened concrete, Part 3: Compressive strength of test specimens.

Initial assessment of the possibility of using glass waste coming from worn-out fluorescent lamps as aggregates for cement concrete

The paper presents preliminary analyzes of the possibilities of using glass waste from extruded fluorescent lamps as aggregates for cement concretes. The research material was obtained from a company that utilizes electrical waste. Glass from pre-sorted lighting elements was transported to the laboratory and crushed in a steel mortar. In this way, the aggregate obtained was subjected to the basic tests that are carried out for aggregates traditionally used in construction. The specific density of aggregate, bulk density, absorbability, grain shape and texture type were examined. In the next stage of research work, a concrete mix was made, in which, as a substitute for 25% gravel aggregate, crushed aggregate from crushed fluorescent lamps was used. The compressive and tensile strength of the concrete thus formed was tested. Analysis of the test results showed that broken glass from worn out fluorescent lamps can potentially be used as an aggregate for cement concrete.

Autorzy:

dr inż. **Bartosz Zegardło** - Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach, Wydział Przyrodniczy, bart.z@wp.pl

mł. bryg. dr inż. **Tomasz Drzymala** - Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Katedra Bezpieczeństwa Budowli i Rozpoznawania Zagrożeń, Zakład Podstaw Budownictwa i Materiałów Budowlanych, t.drzymala@sgsp.edu.pl

prof. dr hab. **Jerzy Nitychoruk** - Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Zakład Budownictwa, Katedra Nauk Technicznych, j.nitychoruk@dydaktyka.pswbp.pl

dr inż. **Beata Jaworska** - Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Ładowej.

JEL: Q01 DOI: 10.24136/atest.2018.083

Data zgłoszenia: 2018.05.22 Data akceptacji: 2018.06.15