

mgr inż. Paweł Sikora<sup>1)</sup>dr hab. inż. Elżbieta Horszczaruk, prof. ZUT<sup>2)\*)</sup>dr inż. Teresa Rucińska<sup>2)</sup>Agnieszka Straszynska<sup>2)</sup>

# Wpływ wysokiej temperatury na właściwości mechaniczne zapraw cementowych ze stłuczką szklaną

*The influence of elevated temperature on the mechanical properties of cement mortars with waste glass*

DOI: 10.15199/33.2015.05.47

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu wysokiej temperatury na wybrane właściwości mechaniczne zapraw cementowych zawierających zamiennik kruszywa naturalnego w formie stłuczki szklanej. Pokazują one, że stłuczka szklana pochodząca z odpadów komunalnych stosowana jako zamiennik kruszywa może znaleźć zastosowanie w produkcji kompozytów cementowych o podwyższonej odporności na działanie wysokiej temperatury.

**Słowa kluczowe:** pożar, zaprawy cementowe, stłuczka szklana, wysoka temperatura, właściwości mechaniczne.

**Abstract.** In the study the influence of elevated temperature on the selected mechanical properties of cement mortars containing waste glass as a sand replacement is presented. Study has shown that use of waste glass as a sand replacement can contribute to obtain cementitious composites exhibiting similar or improved high temperature resistance.

**Keywords:** fire, cement mortars, waste glass, elevated temperature, mechanical properties.

Jedną z metod redukcji kosztów produkcji betonów cementowych może być zastosowanie materiałów odpadowych jako zamiennika kruszywa. W ostatnich latach recykling odpadów szklanych stał się poważnym problemem dla ludności na całym świecie. Wysokie koszty utylizacji różnego asortymentu szkła (różnobarwność utylizowanego szkła) oraz duża ilość zanieczyszczeń powstających podczas tego procesu powodują, że tylko niewielka ilość masy odpadowej jest powtórnie wykorzystywana. Mowa tutaj w szczególności o najdrobniejszych frakcjach, które ze względu na swój rozmiar i duży stopień zanieczyszczenia nie nadają się do recyklingu i w efekcie składowane są na hałdach. Największy udział w utylizowanym szkłe mają szkła bezbarwne, gdyż proces ich odzyskiwania jest najbardziej efektywny i stosunkowo prosty. Szkło barwione może być odzyskane

tylko w niewielkiej części i jest to kosztowny proces, więc zdecydowana większość odpadów z barwionego szkła nie jest powtórnie przetwarzana [1].

Koncepcja utylizacji odpadów szklanych w budownictwie pojawiła się w pracach naukowych już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku, jednak badania te nie przyniosły satysfakcjonujących rezultatów [5]. Wraz ze zwiększoną produkcją odpadów oraz trendami ekologicznymi w drugiej połowie XX wieku zagadnienie to ponownie zaczęło cieszyć się dużym zainteresowaniem. Stłuczka szklana z racji swojego składu chemicznego przejawia właściwości pucolanowe (szczególnie drobno zmielona) i w pewnych ilościach może przyczynić się do poprawy parametrów wytrzymałościowych kompozytów cementowych [2]. Nie bez znaczenia pozostaje także kolor wykorzystywanego w kompozytach cementowych szkła. Wykazano, że zielone szkło może być lepszym dodatkiem niż szkło brązowe, ponieważ jego współczynnik rozszerzalności cieplnej jest niższy niż szkła brązowego. Najprawdopodobniej spowodowane jest to dodatkiem tlenku chromu, który barwi szkło na kolor zielony. Kolor szkła mo-

że mieć także wpływ na właściwości mechaniczne kompozytów cementowych, lecz różnice są niewielkie i z natury pomijane [3].

Wiele prac naukowych koncentruje się na zastosowaniu stłuczki szklanej jako częściowego zamiennika naturalnego kruszywa w betonie i zaprawach cementowych. Potwierdzono, że wykorzystanie stłuczki szklanej jako komponentu zapraw cementowych nie ma istotnego wpływu na ich urabialność i wytrzymałość. Dodatkowo stwierdzono, że próbki zapraw zawierające szkło charakteryzowały się mniejszą zawartością powietrza i mniejszym ciężarem właściwym niż zaprawy niemodyfikowane [3].

W ostatnich latach pojawiła się nowa koncepcja zastosowania stłuczki szklanej do betonu w celu zwiększenia jego odporności na wysoką temperaturę podczas pożaru [6-9]. Źródłem pozyskania stłuczki szklanej mogą być odpady komunalne i przemysłowe, np. z produkcji i utylizacji monitorów LCD czy wyświetlaczy telefonów komórkowych [10].

Właściwości fizyczne szkła, takie jak: gęstość, wytrzymałość na ścislenie, moduł sprężystości, współczynnik roz-

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

<sup>2)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:

e-mail: elzbieta.horszczaruk@zut.edu.pl

szerszalności cieplnej oraz współczynnik przewodności cieplnej są zbliżone do właściwości betonu i pozwalają na zastosowanie szkła odpadowego jako efektywnego zamiennika kruszywa naturalnego [9]. Z badań [7] wynika, że zastosowanie kruszywa ze szkła butelkowego w kompozytach cementowych, przede wszystkim drobnych jego frakcji, ze względu na relatywnie niską temperaturę topnienia ( $700\text{ }^{\circ}\text{C} - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), w przypadku oddziaływania wysokiej temperatury powoduje doszczelnienie mikrostruktury kompozytu cementowego, przyczyniając się do redukcji negatywnego wpływu temperatury na jego właściwości mechaniczne.

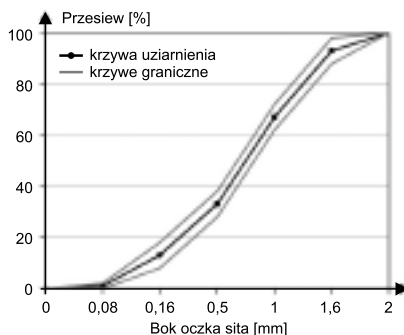
W artykule omówiono badania wpływu wysokiej temperatury na wybrane właściwości mechaniczne zapraw cementowych zawierających zamiennik kruszywa naturalnego w formie stłuczki szklanej w celu potencjalnego zredukowania negatywnego oddziaływania wysokiej temperatury na właściwości mechaniczne kompozytów cementowych.

## Zastosowane materiały i metodyka badań

Wykorzystano brązową stłuczkę szklaną pochodzącą z odpadów komunalnych, która nie została zakwalifikowana do powtórnego przetopienia. Zastosowanie brązowej stłuczki szklanej podyktowane było faktem segregowania i składowania tego odpadu na oddzielnym składowisku. Odpad stanowią najczęściej butelki po napojach wykonane z tego samego rodzaju szkła. W przypadku szkła białego i zielonego materiał jest wymieszany oraz ma wielorakie źródło pochodzenia, co wpływać może na wyniki badań.

Do wykonania zapraw zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R spełniający wymagania PN-EN 197-1, piasek wzorcowy CEN (kwarcowy) zgodny z PN-EN 196-1 oraz wodę wodociągową. Zaprojektowano 4 zaprawy cementowe, w których 0, 25, 50 oraz 100% projektowanej masy kruszywa zastąpiono stłuczką szklaną. Stłuczkę szklaną zmielono za pomocą młynka kulowego, przesiano i zmieszano z piaskiem wzorcowym w ilości zgodnej z rozkładem ziarn piasku normowego wg PN-EN 196-1. Krzywą uziarnienia kruszywa ze stłuczki szklanej zastoso-

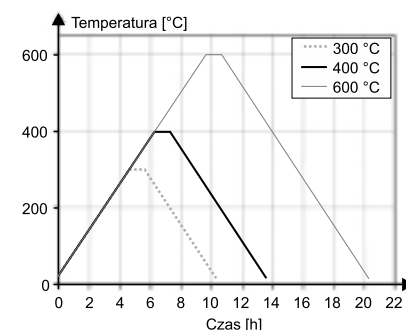
wanego w badaniach przedstawiono na rysunku 1. Ponadto oznaczono jego gęstość objętościową w stanie zagęszczonym, która wynosiła  $1,58\text{ kg/m}^3$ . Zaprawy oznaczono jako: R – próbka wzorcowa, bez dodatku stłuczki szklanej oraz próbki S25, S50 i S100, w których liczba oznacza procentową zawartość stłuczki szklanej w stosunku do objętości piasku w zaprawie wzorcowej. Skład badanych zapraw przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia stłuczki szklanej stosowanej jako zamiennik kruszywa drobnego

Fig. 1. Particle size distribution of waste glass used as an aggregate

maksymalną temperaturę zadaną programem badań. Studzenie próbek odbywało się z prędkością  $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  (rysunek 2). Po wyjęciu z pieca próbki zważono i wizualnie oceniono uszkodzenia powstałe na skutek temperatury, a następnie poddano badaniom wytrzymałościowym. Oznaczono wytrzymałość na zginanie i ściskanie wszystkich próbek zgodnie z PN-EN 196-1. Wartości średnie wytrzymałości zapraw na zginanie w zadanej temperaturze wyznaczono na podstawie ba-



Rys. 2. Schemat procesu wygrzewania zapraw

Fig. 2. Heating-cooling cycles of cement mortars

Tabela 1. Skład i konsystencja badanych zapraw cementowych [ $\text{kg/m}^3$ ]  
Table 1. Composition and consistency of cement mortars [ $\text{kg/m}^3$ ]

Oznaczenie próbek	Cement	Woda	Wskaźnik w/c	Piasek kwarcowy	Stłuczka szklana [% objętości piasku]	Konsystencja (średnica rozprylu) [mm]
R	519	257	0,5	1546,0	–	165
S25	519	257	0,5	1159,5	25	163
S50	519	257	0,5	773,0	50	169
S100	519	257	0,5	–	100	166

Oznaczono konsystencję wszystkich zapraw metodą stolika rozprylu (wg PN-EN 1015-3), a następnie wykonano próbki do badania wytrzymałości w kształcie beleczek o wymiarach  $4 \times 4 \times 16\text{ cm}$ , zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 196-1. Próbkę rozformowano po 24 h i przechowywano w wannie z wodą o temperaturze  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  przez 28 dni. Po tym czasie próbki wyjęto z wanny i suszono do stałej masy w celu wyznaczenia gęstości objętościowej w stanie suchym. Tak przygotowane próbki zostały poddane działaniu wysokiej temperatury w średniotemperaturowym piecu komorowym z programatorem.

Maksymalna temperatura wygrzewania próbek wynosiła:  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  oraz  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Przy wygrzewaniu próbek zastosowano procedurę RILEM [5]. W pierwszym etapie przyrost temperatury następował z prędkością  $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ . Następnie przez 1 h utrzymywano

dań sześciu próbek danej zaprawy, a wartości średnie wytrzymałości na ściskanie na podstawie badań dwunastu próbek.

## Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań właściwości mechanicznych zapraw w zależności od temperatury przedstawiono w tabeli 2. Analizy zmian wytrzymałości badanych zapraw pod wpływem temperatury nagrzewu dokonano na podstawie przebiegu względnych zmian wytrzymałości w funkcji temperatury nagrzewu  $T$  (rysunek 3 i 4), porównując uzyskane wartości wytrzymałości zapraw po zadanym cyklu zmian temperatury  $t$  do wartości wytrzymałości w temperaturze  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

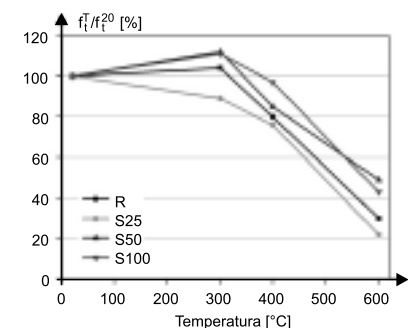
Na podstawie wyników badań własnych stwierdzono, że w temperaturze  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  następuje poprawa właściwości mechanicznych zapraw w porównaniu z właściwościami w tempe-

raturze 20 °C (wartości wyjściowe stanowiące punkt odniesienia). Początek pogarszania się właściwości mechanicznych zapraw, niezależnie od ich składu, zaobserwowano w temperaturze 400 °C. W przypadku wytrzymałości na zginanie dotyczyło to wszystkich zapraw (rysunek 3), natomiast wytrzymałość na ściskanie w temperatu-

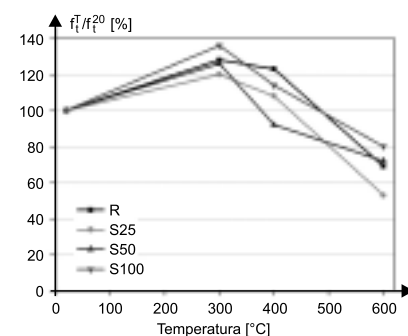
**Tabela 2. Właściwości mechaniczne zapraw po wygrzewaniu w wysokiej temperaturze**

Table 2. Mechanical properties of tested mortars exposed to elevated temperature

Oznaczenie próbek	Temperatura wygrzewania próbek [°C]			
	20	300	400	600
<b>Średnia wytrzymałość na zginanie <math>f_t</math> [MPa]</b>				
R	8,3	8,7	6,7	2,5
S25	8,8	8,9	6,7	1,93
S50	7,6	8,5	6,45	3,7
S100	8,2	9,07	8	3,5
<b>Średnia wytrzymałość na ściskanie <math>f_c</math> [MPa]</b>				
R	51,0	65,2	62,8	35,4
S25	52,8	63,6	56,9	28,4
S50	49,9	63,2	46,2	35,9
S100	45,6	62,0	51,8	36,6



**Rys. 3. Zmiana wytrzymałości zapraw na zginanie w zależności od temperatury**  
Fig. 3. Flexural strength of tested mortars after various temperature exposures

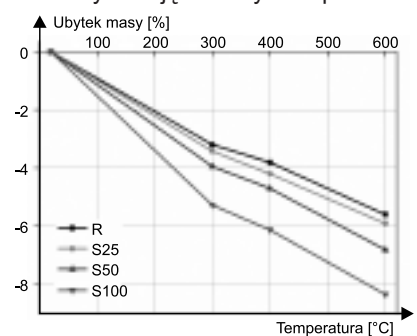


**Rys. 4. Zmiana wytrzymałości zapraw na ściskanie w zależności od temperatury**  
Fig. 4. Compressive strength of tested mortars after various temperature exposures

rze 400 °C była wyższa od wytrzymałości wyjściowych próbek w temperaturze 20 °C (tylko w przypadku zaprawy S50 zaobserwowano nieznaczny spadek tej wytrzymałości).

Po ogrzaniu zapraw do temperatury 600 °C ich właściwości mechaniczne gwałtownie się pogorszyły. Spadek wytrzymałości na zginanie w stosunku do wytrzymałości wyjściowej wynosił 53 – 72%, a wytrzymałości na ściskanie 22 – 49%. Na uwagę zasługują wyniki badań uzyskane w przypadku zapraw S100, tzn. przy całkowitym zastąpieniu kruszywa naturalnego kwarcowego stłuczką szklaną. Pomimo niewielkiej wytrzymałości początkowej w temperaturze 20 °C w stosunku do zapraw na kruszywie kwarcowym R, w temperaturze 600 °C badane zaprawy wykazały wyższą wytrzymałość niż zaprawy typu R.

Analiza ubytków masy próbek zapraw w funkcji temperatury nagrzewu (rysunek 5) pokazuje wyraźny spadek masy badanych próbek wraz ze wzrostem temperatury. Jest to wynik uwalniania się wody chemicznie związanej w żelu C-S-H. W obserwacjach makroskopowych próbek po nagrzewie nie stwierdzono zarysowania powierzchni w przypadku próbek zapraw z dodatkiem stłuczki szklanej. Analizując wyniki badania konsystencji zapraw metodą stolika rozplwy przedstawione w tabeli 1, stwierdzono, że zastosowanie zmielonej stłuczki szklanej jako zamiennika kruszywa kwarcowego nie wpłynęło na konsystencję badanych zapraw.



**Rys. 5. Ubytek masy próbek zapraw w zależności od temperatury**  
Fig. 5. Weight losses of cement mortars after various temperature exposures

**Podsumowanie**

Przedstawione badania pokazały, że zastosowanie stłuczki szklanej jako częściowego lub całkowitego zamiennika kruszywa drobnego do produkcji

zapraw cementowych odpornych na wysoką temperaturę jest godne zainteresowania i należy kontynuować prace badawcze. Stłuczka szklana nie wpływa negatywnie na konsystencję zapraw, a zastosowanie jej jako kruszywa pozwala na poprawę właściwości mechanicznych kompozytu cementowego w wysokiej temperaturze. Stosowanie stłuczki szklanej jako zamiennika kruszywa w zaprawach i betonach cementowych pozwoli na zmniejszenie jej składowania oraz ochronę naturalnych zasobów kruszywa [4]. Szczególnie obiecujące wydają się wyniki badań właściwości mechanicznych w wysokiej temperaturze uzyskane w przypadku zapraw z 50 i 100% zawartością stłuczki szklanej.

**Literatura**

[1] Aly M., Hashmi M. S. J in al., Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behavior of waste-glass cement mortar, Materials and Design, 33/2012.  
 [2] Bhandari. P. S, Tajne. K. M., Use of waste glass in cement mortar, International Journal of Civil and Structural Engineering, 4/2013.  
 [3] Degirmenci N., Yilmaz A. in al.: Utilization of waste glass as sand replacement in cement mortar, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 18/2011.  
 [4] Najduchowska M., Różycka K., Rolka G., Ocena możliwości wykorzystania stłuczki szklanej w przemyśle budowlanym w aspekcie jej wpływu na środowisko naturalne, Prace ICiMB, 17/2014.  
 [5] Rilem Technical Committees 129-MHT, Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, part 1: introduction, part 2: stress-strain relation, part 3: compressive strength for service and accident conditions, Materials and Structures 28/1995.  
 [6] Shi C., Zheng K., A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete, Conservation and Recycling, 52/2007.  
 [7] Terro M. J.: Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures, Building and Environment, 41/2006.  
 [8] Topcu I. B., Canbaz M.: Properties of concrete containing waste glass, Cement and Concrete Research, 34/2004  
 [9] Wang H-Y., Hou T-C.: A Study of Elevated Temperatures on the Strength Properties of LCD Glass Powder Cement Mortars. Integrated Waste Management – Volume I – Chapter 20, InTech, Shanghai 2011.  
 [10] Wang H-Y.: The effect of the proportion of thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar. Construction and Building Materials, 25/2011.

Otrzymano 13.12.2014 r.