

dr inż. **Paweł OGRODNIK**

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

mgr inż. **Bartosz ZEGARDŁO**

Collegium Mazovia Innowacyjna Szkoła Wyższa w Siedlcach

dr hab. inż. **Anna HALICKA**, prof.PL

Politechnika Lubelska

# **WSTĘPNA ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA ODPADÓW CERAMIKI SANITARNEJ JAKO KRUSZYWA DO BETONÓW PRACUJĄCYCH W WYSOKICH TEMPERATURACH**

**Preliminary assessment of utilization of sanitary ceramics wastes  
as an aggregate in concrete working at the high temperature**

## **Streszczenie**

Praca niniejsza stanowi kontynuację badań nad zastosowaniem odpadów ceramiki sanitarnej do produkcji betonów specjalnych. Przeprowadzone dotychczas prace badawcze autorów dowiodły, iż rozdrobnione odpady mogą spełniać rolę kruszywa do betonów. Odpowiednio zaprojektowane mieszanki betonowe przygotowane na bazie odpadów ceramicznych wykazały że rozdrobniona stłuczka sanitarna może spełniać rolę kruszywa zarówno do betonów zwykłych jak i wysokowartościowych.

Przytoczona w niniejszym artykule szczegółowa analiza zagadnienia odporności betonów na wysokie temperatury pozwoliła autorom na postawienie tezy o potencjalnej możliwości wykorzystania kruszywa z odpadów ceramicznych również do betonów ogniotrwałych i żaroodpornych. Podstawę ku temu założeniu dała analiza składu chemicznego materiału ceramicznego oraz porównanie jej ze składem cementów żaroodpornych.

Zauważone tu podobieństwo występujących związków chemicznych skłoniło do zaprojektowania na bazie tych substratów betonu odpornego na wysokie temperatury.

W pracy niniejszej zrelacjonowano wyniki badań własnych betonu sporządzonego na bazie kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej w aspekcie jego odporności na wysokie temperatury. Tym samym badaniom poddano serie próbek betonów porównawczych przygotowanych na bazie kruszyw tradycyjnych. Analizując wyniki badań stwierdzono, że beton na kruszywie ceramicznym może być stosowany w warunkach wysokich temperatur, a jego odporność na wysokie temperatury jest wyższa niż betonów na kruszywach powszechnie stosowanych do mieszanek betonowych.. Zbadane parametry wytrzymałościowe betonu na kruszywie ceramicznym po wygrzewaniu w temperaturze 1000<sup>0</sup>C przewyższyły znacznie parametry wygrzewanych betonów na kruszywach tradycyjnych. Próbki betonowe przygotowane na bazie kruszywa ceramicznego po wygrzewaniu zachowały swój kształt i spójność. Brak było na nich

ślądów rys i pęknięć. Pomimo pewnego spadku parametrów wytrzymałościowych charakteryzowały się wciąż wysoką wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie.

Na podstawie wniosków z przeprowadzonych badań i analiz własnych autorzy rekomendują kruszywo powstałe z odpadów ceramiki sanitarnej w zastosowaniach do betonów pracujących w warunkach wysokich temperatur.

### Summary

This article is a continuation of studies on the application of sanitary waste to produce special concretes. Research works carried out so far have shown that the shredded waste can fulfill the role of aggregates in concrete. A properly designed concrete mixes prepared from waste showed that the fragmented ceramic sanitary cullet can be used as aggregate in ordinary and high value concretes. Quoted in this article a detailed analysis of high temperature concrete resistance has allowed the authors to place their arguments about the potential use this aggregate to refractory and heat resistance concretes. The basis for this assumption given the analysis of chemical composition of ceramic material and compare it with the composition of refractory cements. Similarity observed here occurring chemical compounds led to the design based on these substrates, concrete, resistant to high temperatures. In this work authors reported their findings on the basis of concrete made with aggregates of sanitary waste in terms of its resistance to high temperatures. The same tests were a series of comparative concrete samples prepared from conventional aggregates. Analyzing the results it was concluded that the aggregate concrete ceramic can be used at high temperatures, and its resistance to high temperatures is higher than for concrete aggregates commonly used in concrete mixes. Examined the strength parameters of concrete aggregate ceramics after annealing at a temperature substantially higher than 1000°C concrete parameters for conventional aggregates. Concrete samples prepared from ceramic aggregate after annealing preserved their shape and consistency. There were no traces and cracks. Despite a certain decrease in the strength parameters are still characterized by a high compressive strength and tensile strength. Based on the conclusions of these studies and analyzes of individual authors recommend aggregates produced from waste sanitary ceramics in applications to concrete work at high temperatures.

**Słowa kluczowe:** beton, żaroodporność, kruszywo, ceramika sanitarna, odpady;

**Key words:** concrete, heat resistance, aggregates, sanitary ceramics, recycling;

## 1. Wstęp

Graniczną, bezpieczną temperaturą, w której można stosować betony zwykłe na cemencie portlandzkim jest 250°C. Betony pracujące w wyższych temperaturach zalicza się do betonów specjalnych. Mają one skład skomponowany na bazie specjalnych spoiw ogniotrwałych. Rozróżnia się betony żaroodporne – przeznaczone do pracy w podwyższonych temperaturach (wyższych niż 250°C) i ogniotrwałe pracujące w wysokich temperaturach (nawet 2000°C i większych). Literatura nie wyznacza ścisłej granicy temperaturowej pomiędzy żaroodpornością a ogniotrwałością betonów. Spotyka się tu wartości 1000°C [4], 1200°C [2] lub nawet 1500°C.

## 2. Skład betonu a jego zachowanie się w wysokich temperaturach

Podstawowy wpływ na odporność betonu na wysokie temperatury ma spoiwo. Graniczne temperatury stosowania cementów portlandzkich w podwyższonych temperaturach wynikają z reakcji chemicznych zachodzących podczas wygrzewania. Są to:

- odparowanie wolnej wody w temperaturze około 100°C,
- usunięcie wody związanej fizycznie w temperaturze 180°C,
- usunięcie wody związanej chemicznie w temperaturze około 500°C (wodorotlenek wapnia, wchodzący w skład utworzonej podczas wiązania sieci krystalicznej, przechodzi w wolne wapno zdolne do samoczynnego powtórnego wiązania  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ),
- przemiana kwarcu w temperaturze 570°C,
- rozkład węglanu wapnia w temperaturze 700°C.

Procesem szczególnie niekorzystnym jest usunięcie wody związanej chemicznie. Reakcji tej towarzyszy znaczny wzrost objętości związków wapna o około 40% , w wyniku czego beton ulega znacznemu spękaniu tracąc swoją wytrzymałość. Powtórna ekspozycja na wilgoć atmosferyczną wywołuje wiązanie wody  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$  .

Bardziej odporne na wysokie temperatury są tzw. cementy glinowe zawierające w swym składzie znaczne ilości tlenku glinu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ich odporność na działanie wysokich temperatur zależy od zawartości tlenku glinu np. cementy wysokoglinowe o zawartości 80%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mogą pracować nawet w temperaturach wyższych od 1800°C. Charakterystykę składu cementów glinowych w porównaniu ze składem cementu portlandzkiego przedstawiono w Tab.1.

Na żaroodporność i ogniotrwałość betonów w dużej mierze wpływa również zastosowane kruszywo. Podobnie jak w przypadku cementów, odporność kruszywa na wysokie temperatury w dużej mierze zależy od składu chemicznego, a regulują ją często te same czynniki, jak w przypadku cementów np. zawartość tlenku glinu. Zakresy temperaturowe zastosowań różnych kruszyw oraz ich krótkie charakterystyki przedstawia Tab.2.

Tabela 1.

### Skład chemiczny cementów glinowych i jego wpływ na żaroodporność

Table 1

#### Chemical composition of the alumina cement and its influence on the heat-resistance

Składnik (Component) (%)	Cement glinowy o niskiej zawartości $\text{Al}_2\text{O}_3$ (Alumina cement of low	Cement glinowy o średniej zawartości $\text{Al}_2\text{O}_3$ (Alumina cement of	Cement glinowy o wysokiej zawartości $\text{Al}_2\text{O}_3$ (Alumina cement of high	Cement glinowy o bardzo wysokiej zawartości $\text{Al}_2\text{O}_3$ (Alumina	Cement portlandzki (Portland cement)

**BADANIA I ROZWÓJ**

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content)	average Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content)	cement of very high Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content)	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36-42	48-60	65-75	80-82	4-6
CaO	36-40	36-40	25-30	15-20	63-67
SiO <sub>2</sub>	3-8	3-8	<0,5	<0,2	19-23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12-20	1-3	<0,5	<0,2	2-3,5
TiO <sub>2</sub>	≈2	≈3	-	-	≈0,5
Żaroodporność (Heat-resistance)	1200°C	1400°C	1600°C	1800°C	250°C

Tabela2.

**Zakresy temperaturowe zastosowań różnych kruszyw**

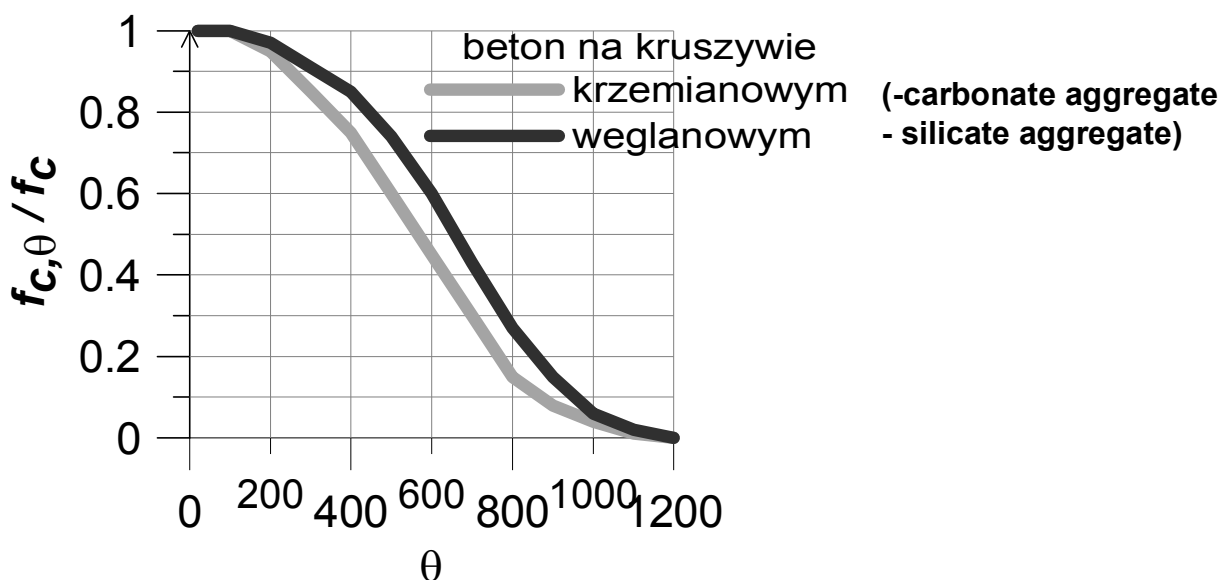
Table 2

**Temperature limit of aggregates utilization**

Kruszywo (aggregate)	Zastosowanie do temperatury (Temperature limit) $t_{lim}$ (°C)	Uwagi/charakterystyka (Notes / characteristics)
Piasek (sand)	350	Topi się w wyższych temperaturach (It melts at temperature higher than $t_{lim}$ )
Wapień (limestone)	500	Zachodzi zjawisko przejścia wodorotlenku wapna w wolne wapno (calcium hydroxide is changed to free calcium at $t_{lim}$ )
Bazalt, ganit, (basalt, granite)	900	Utrata właściwości w wyższych temperaturach [2] (Decrease of strength at temperature higher than $t_{lim}$ [2])
Szamot (chamotte)	1400	Uzyskuje się go przez wypalanie kaolinu lub innych glin ogniotrwałych. Główne składniki chemiczne to krzemionka i tlenek glinu (It is obtained by kaolin or other heat-resistant clay burning. The main chemical constituents are silica SiO <sub>2</sub> and alumina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Korund (corundum)	1900	Duża wytrzymałość mechaniczna. Odporność na środowisko agresywne chemicznie. Zawiera 96-99% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (High mechanical strength. Resistance to chemically aggressive environment. It contains 96-99% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Magnezyt spiekany (sintered magnesite)	2000	Duża przewodność cieplna, duży współczynnik rozszerzalności cieplnej (The high thermal conductivity, high thermal expansion coefficient)
Fosteryt (forsterite)	2000	Uzyskiwany przez spieczenie fosterytu naturalnego (It is obtained by natural forsterite sintering)
Karborund (carborundum)	Powyżej (above) 2000	Uzyskiwany przez spiekanie piasku z koksem. Wysoka wytrzymałość mechaniczna, wysoka odporność na środowisko agresywne chemicznie. (It is obtained by sintering of sand with coke. High mechanical strength, high resistance to chemically aggressive environment)
Spiekane gliny, żużle, keramzyt (sintered clay, slag, expanded clay)	1400	Stosowane do betonów nie przenoszących obciążeń – izolacyjnych pracujących w wysokich temperaturach. (It used as thermal insulation, not for carrying loads concrete)

Procesy fizykochemiczne zachodzące w ziarnach kruszywa podczas wygrzewania prowadzą do rozluźnienia struktury wewnętrznej betonu i w konsekwencji do spadku wytrzymałości. Zależność wytrzymałości betonu od temperatury, przyjętą w normie Eurokod 2 – 1-2[6]

przytoczono na Rys.1. Wynika z niego, że z betony sporządzone na bazie dwóch najbardziej popularnych grup kruszyw (kruszywa wapienne i kruszywa z dużym udziałem krzemianów) zachowują się w wysokich temperaturach podobnie, choć spadek wytrzymałości w przypadku kruszyw krzemianowych jest nieco szybszy. Początek topienia zachodzi w temperaturze 1150°C, a w 1300°C następuje całkowite zniszczenie struktury.



**Ryc.1** Zależność wytrzymałości betonu od temperatury dla betonów na kruszywie krzemianowym i węglanowym

**Fig. 1** The influence of the temperature on the concrete strength

O zastosowaniu kruszywa do betonu żaroodpornego lub ogniotrwałego decyduje nie tylko odporność na zachodzące w wysokich temperaturach reakcje chemiczne, ale również to, w jakim stopniu odkształcalność termiczna kruszywa jest zbliżona do wiążącego je zaczynu. Większa odkształcalność termiczna kruszywa niż zaczynu powoduje wewnętrzne naprężenia rozciągające prowadzące do zniszczenia struktury betonu.

Często wytyczną do zastosowania konkretnego rodzaju kruszywa do betonu pracującego w wysokiej temperaturze są poboczne cechy takie jak np. przewodność cieplna lub odporność na środowiska agresywne. Dotyczy to ogniotrwałych betonów izolacyjnych, wykorzystywanych jako wykładziny pieców i kominów przemysłowych. Warunki ich pracy wymagają odporności na wysokie temperatury oraz odporności na agresywne chemicznie środowisko.

Dodatkowym czynnikiem wpływającym na zachowanie się betonu podczas wygrzewania jest jego wilgotność. Woda zawarta w porach zamieniona w parę wodną wywiera ciśnienie na ścianki porów powodując wewnętrzne naprężenia rozciągające, co może prowadzić do eksplozyjnego odpryskiwania fragmentów betonu (tzw. spalling).

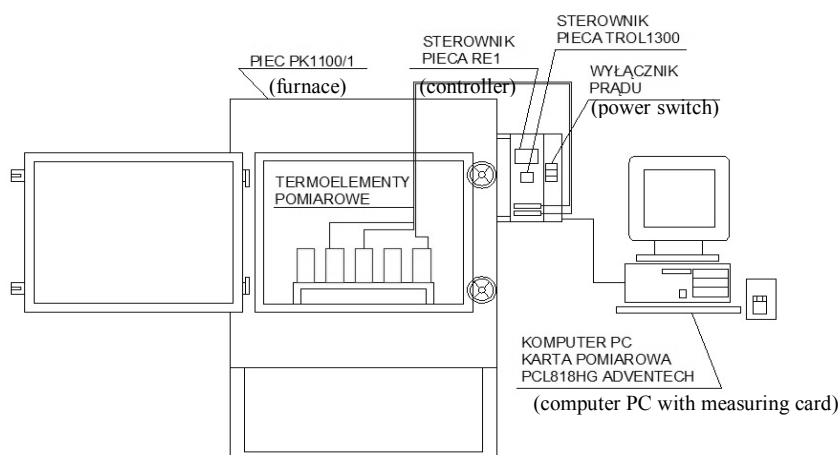
### 3. Beton na bazie kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej

Analizując skład chemiczny ceramiki sanitarnej stwierdzić można, że zawiera ona znaczne ilości związków glinowych, podobnie jak wykorzystywany w betonach żaroodpornych cement glinowy. Fakt ten skłonił autorów do zaprojektowania betonu, który w swym składzie zawierał obydwie wymienione składniki. Zaprojektowano beton na bazie cementu glinowego o zawartości 70 % tlenku glinu oraz odpowiednio dobrane ilości kruszywa ceramicznego, przygotowanego przez zmielenie odpadów ceramiki sanitarnej i odpowiednie rozfrakcjonowanie. Opis procesu projektowania betonu oraz wyniki badań wytrzymałościowych w sposób szczegółowy przedstawiono w publikacji [1]. Skład zaprojektowanego betonu był następujący: cement glinowy 493,38 kg/m<sup>3</sup>, kruszywo frakcji 0-4mm 991,37 kg/m<sup>3</sup>, kruszywo frakcji 4-8 mm 396,55 kg/m<sup>3</sup>, woda 201,38 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu o powyższym składzie wynosiła 90,54 MPa, a na rozciąganie 9,56 MPa.

### 4. Badania odporności betonu na kruszywie z odpadów ceramiki sanitarnej na działanie wysokich temperatur

#### 4.1 Stanowisko badawcze

Badanie odporności na wysoki temperatury przeprowadzono w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. Zasadniczym trzonem stanowiska do wykonania badań był średnotemperaturowy piec komorowy typu PK1100/1. Szkielet pieca wykonany jest z rur kwadratowych i nierdzewnej stalowej blachy. Warstwę izolacyjną stanowią kształtki i mata z włókien ceramicznych. Elementy grzejne pieca wykonane zostały z drutu oporowego KANTHAL A1 w kształcie spiral. Schemat stanowiska pokazano na Rys. 2 oraz na Fot.3 i Fot.4. Podstawowe parametry pieca zostały przedstawione w Tab. 3



**Ryc..2** Schemat pieca typu PK1100/1  
**Fig. 2** The scheme of the furnace type PK1100/1

**Parametry pieca typu PK 1100/5**

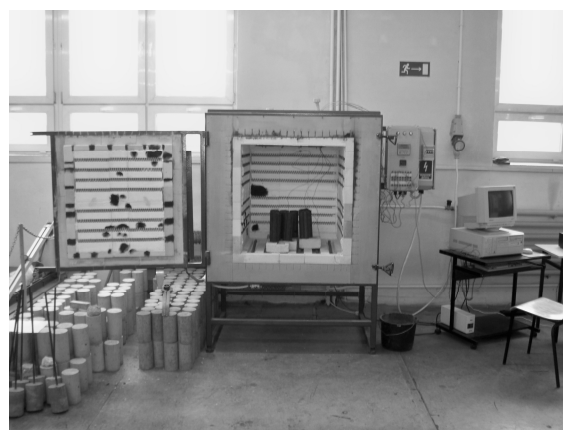
**The parameters of the furnace PK 1100/5**

<b>Parametry pieca (parameters of the furnace):</b>	
Zasilanie (power)	230/400 [V], 50 [Hz]
Moc znamionowa (power rating)	20 [kW]
Temperatura znamionowa (temperature rating)	1100 [°C]
Objętość komory pieca (volume of furnace chamber)	0,41 [m <sup>3</sup> ]
Dopuszczalne obciążenie trzonu pieca (load limit)	100 [kg]
Wymiary przestrzeni użytkowej (dimensions of chamber)	770x750x710
Wymiary gabarytowe (overall dimensions)	1275x1770x940
Masa pieca (weight of furnace)	~450 [kg]

Ze względu na możliwość wystąpienia zjawiska spallingu, w celu zabezpieczenia pieca przed uszkodzeniem, próbki przygotowano w małych formach o wymiarach 4x4x16 i umieszczono je w piecu w specjalnie przygotowanych osłonach stalowych. Próbki wygrzewano do temperatury 1000°C.

Rejestracja i pomiar temperatury odbywał się za pomocą komputera PC który współpracuje z kartą PCL818HG ADVETECH.

**Fot. 3**  
Stanowisko badawcze – piec do wygrzewania próbek betonowych



**Photo. 3**  
The test station: the furnace used for heating concrete specimens

**Fot. 4**  
Próbki w osłonach stalowych



**Photo. 4**  
The specimens in steel jackets

#### **4.2 Próbkki do badań i właściwości badanych betonów**

Do badania przygotowano: 3 próbki betonu na cemencie glinowym z kruszywem z ceramiki sanitarnej oraz próbki porównawcze: 2 próbki z zaczynu na cemencie glinowym, 3 próbki betonowe na cemencie portlandzkim i kruszywie żwirowym, 2 próbki z zaczynu na cemencie portlandzkim, oraz wygrzewane w kolejnej próbie 3 próbki betonowe na cemencie glinowym i kruszywie żwirowym.

Wygrzewanie próbek poprzedzone zostało badaniami wytrzymałościowymi, wykonanymi w Laboratorium Budownictwa Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. W Tab.4 zestawiono cechy betonów (skład i właściwości wytrzymałościowe), użytych do wykonania poszczególnych serii próbek.

#### **4.3 Przebieg badań**

Ze względu na zachodzące w betonie podczas jego wygrzewania procesy fizykochemiczne literatura nakazuje podzielić schemat wprowadzania betonu do pracy w wysokich temperaturach na kilka etapów [2,3]:

- Etap pierwszy od 0 do 150°C, w którym odparowuje woda wolna – powinien on trwać 15 godzin przy założeniu przyrostu temperatury ok. 10°C/h,
- Etap drugi od 150 do 550°C, podczas którego następuje oddzielenie się wody chemicznie związanej, w którym przyrost temperatury powinien wynosić około 15°C/h,
- Etap trzeci powyżej 550°C, w którym następuje tzw. spiekanie tj. zamiana wiązań hydraulicznych na ceramiczne, w etapie tym szybkość wzrostu temperatury powinna wynosić 20÷60°C/h.

Element betonowy, po osiągnięciu granicznej temperatury każdego z etapów, powinien w niej pozostawać, w zależności od jego grubości, od 24 do 72 godzin.

Ze względu na ograniczenia czasowe użycia pieca cykl wygrzewania skrócono do 8h. Założono natomiast, że próbki przed wygrzewaniem zostaną wstępnie wysuszone w suszarce laboratoryjnej w schemacie: 4h dochodzenia do temperatury 250°C oraz 4h w temp. 250°C. Cykl wygrzewania próbek w piecu ustalono w następujący sposób:

1. Dochodzenie do temp 150°C przez 2h,
2. Utrzymanie temperatury 150°C przez 1h,
3. Dochodzenie do temp 550°C przez 2h,
4. Utrzymanie temperatury 550°C przez 1h,
5. Dochodzenie do temp 1000°C przez 1,5h,
6. Utrzymanie 1000°C przez 0,5h.





## BADANIA I ROZWÓJ

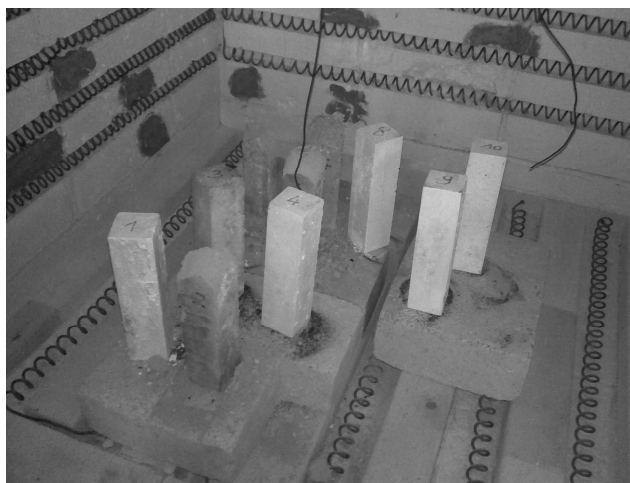
Beton na cemencie glinowym i kruszywie ceramicznym (Concrete based on alumina cement and ceramic aggregate)	Cement (cement) 493,3kg/m <sup>3</sup>  Kruszywo (aggregate) 1387,9kg /m <sup>3</sup>  Woda (water) 201,4 kg/m <sup>3</sup>	3	90,5MPa	9,56MPa	50,4MPa	4,6MPa	55,69	48,11
Beton na cemencie glinowym i kruszywie żwirowym (Concrete based on alumina cement and gravel aggregate)	Cement (cement) 493,3kg/m <sup>3</sup>  Kruszywo (aggregate) 1387,9kg /m <sup>3</sup>  Woda (water) 201,4 kg/m <sup>3</sup>	3	80,4MPa	7,2 MPa	0	0	100	100
Beton na cemencie portlandzkim i kruszywie żwirowym (Concrete based on portland cement and gravel aggregate)	Cement (cement) 493,3kg/m <sup>3</sup>  Kruszywo (aggregate) 1387,9kg /m <sup>3</sup>  Woda (water) 201,4 kg/m <sup>3</sup>	3	42,8MPa	6,35MPa	0	0	100	100

### 5. Wyniki badań

Widok próbek po wyjęciu z pieca przedstawiają fotografie Fot.5 i Fot.6. Wszystkie próbki wykonane na bazie cementu portlandzkiego uległy wyraźnym uszkodzeniom polegającym na samoczynnym wykruszeniu ok. 20% masy materiału w górnych częściach beleczek. Podobnemu zniszczeniu uległy próbki wykonane na bazie cementu glinowego i kruszywa tradycyjnego. Próbki wykonane na bazie cementu glinowego na kruszywie ceramicznym oraz próbki z samego zaczynu z cementu glinowego nie uległy degradacji. Próbki betonowe na bazie cementu glinowego z kruszywem z ceramiki pozostały nie naruszone, a na próbkach wykonanych z samego zaczynu wystąpiły zarysowania.

**Fot. 5**

Próbki po wygrzewaniu po zdjęciu osłon: próbki koloru szarego - beton na cemencie portlandzkim, próbki koloru białego - beton na bazie cementu glinowym



**Photo. 5**

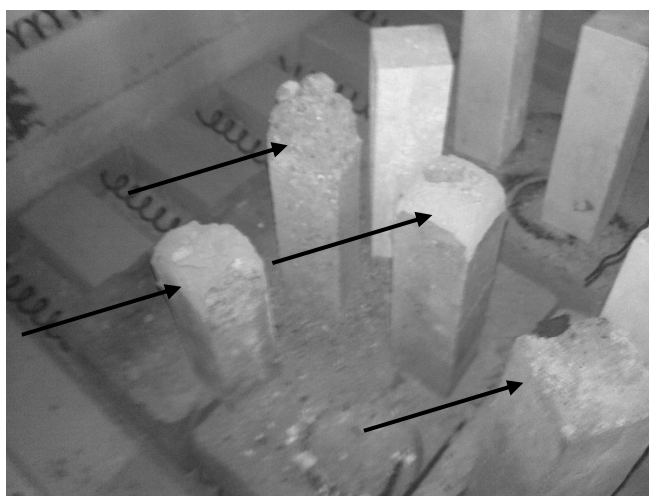
The specimens after heating: grey specimens – concrete based on Portland cement, white specimens – concrete based on alumina cement

**Fot. 6**

Zniszczenia próbek na bazie cementu portlandzkiego po wygrzewaniu

**Photo 6**

The destruction of the specimens based on Portland cement after heating.



Wyniki badań wytrzymałościowych próbek po ostygnięciu przedstawiono w tabelicy 4. Zawarto tu również obliczoną na podstawie tych wyników stratę wytrzymałości betonu po wygrzewaniu. Z zestawionych danych wynika, że jedynie próbki betonu wykonanego na bazie cementu glinowego oraz kruszywa ceramicznego zdołały przetrwać oddziaływanie wysokich temperatur. Pomimo około 50% spadku wytrzymałości, beton ten po wygrzewaniu charakteryzował się wciąż wysoką wytrzymałością zarówno na ściskanie jak i rozciąganie.

Próbki wykonane na bazie cementu glinowego i tradycyjnego kruszywa żwirowego w niedługim czasie po wygrzewaniu również nie miały śladów uszkodzeń. Po kilku dniach od wygrzewania na próbkach w ich górnych częściach pojawiły się pęknięcia. Po 7 dniach od wygrzewania górne części próbek zaczęły się samoczynnie wykruszać tak, że w efekcie nastąpiło ich samoczynne zniszczenie. Przyczyną takiego procesu najprawdopodobniej była ekspozycja na wilgoć i ponowne wiązanie wolnego wapna w ziarnach kruszywa zbudowanych ze związków wapna. Pęczniejące kruszywo spowodowało początkowe spękanie i następnie wykruszenie się części próbek betonowych. Obraz zniszczenia wszystkich próbek wykonanych na bazie cementu portlandzkiego był bardzo podobny, dlatego też przyczynę zniszczenia można upatrywać w tym samym zjawisku

przy czym wzrost objętości wolnego wapna mógł nastąpić nie w kruszywie, a w samym stwardniałym zaczynie cementowym.

Analiza porównawcza zachowania się zaczynu na bazie cementu glinowego oraz sporządzonego na jego bazie betonu z kruszywem ceramicznym po wygrzewaniu wskazała na stosunkowo korzystny wpływ użytego kruszywa. Pomimo nieznacznie mniejszej wytrzymałości na ściskanie po wygrzewaniu betonu w porównaniu z zaczynem, próbki betonowe po wygrzewaniu nie były spękane.

## 6. Wnioski

Przedstawione wyniki badań potwierdziły wstępne założenia o możliwości wykorzystania betonu zaprojektowanego na bazie kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej do pracy w wysokich temperaturach.

Beton na cemencie glinowym i kruszywie ceramicznym pomimo stosunkowo krótkiego procesu wprowadzania do pracy w wysokich temperaturach wykazał niezmienną postać oraz finalnie wysokie parametry wytrzymałościowe bez zachwianej korelacji parametrów ściskanie-rozciąganie. Przedstawione wyniki eksperymentu mogą stanowić podstawę do dalszych prac badawczych nad zastosowaniem kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej do betonów żaroodpornych.

## Literatura

1. Halicka A., Zegardło B., *Odpady ceramiki sanitarnej jako potencjalne kruszywo do betonów specjalnych*, „Przegląd budowlany, 7/8 2011;
2. Jamróży Z., *Beton i jego technologie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006;
3. Kielski A., *Ogólna technologia ceramiki*, Skrypty uczelniane, Kraków 1970;
4. Montgomery R., *Advanced Concrete Technology*, Elsevier 2006;
5. Węgrowski W., Przeździecka K., *Szkło i ceramika*, Państwowe Zakłady Wydawnictw Szkolnych, Warszawa 1979;
6. Eurokod 2 – 1-2 Projektowanie konstrukcji z betonu. Zasady ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe;
7. Ogrodnik P., *Wpływ temperatur występujących w czasie pożaru na przyczepność pomiędzy stalą a betonem*, Praca doktorska, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2006;

**mgr inż. Barosz ZEGARDŁO** - asystent Collegium Mazovia Innowacyjnej Szkoły Wyższej w Siedlcach, specjalista z zakresu technologii betonu

**Wkład merytoryczny:** analiza stanu wiedzy na temat betonów pracujących w warunkach wysokich temperatur; zaprojektowanie składu betonów, badania wytrzymałościowe oraz opracowanie i analiza ich wyników

**Dr hab. inż. Anna HALICKA** – profesor nadzwyczajny Politechniki Lubelskiej, specjalista z zakresu konstrukcji betonowych

**Wkład merytoryczny:** koncepcja i program badań, w tym dobór betonów; nadzór merytoryczny nad badaniami i opracowaniem wyników

**kpt. dr inż. Paweł Ogrodnik**

Absolwent Wydziału Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej Politechniki Lubelskiej (kierunek: budownictwo). W 2001 roku rozpoczął pracę w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. W 2006 roku obronił rozprawę doktorską na temat "Wpływ temperatur występujących w czasie pożaru na przyczepność pomiędzy stalą a betonem".

**Wkład merytoryczny:** zaprogramowanie procesu wygrzewania próbek i przeprowadzenie badań, ocena próbek po wygrzewaniu

**Badania przeprowadzono w laboratoriach:**

Laboratorium Budownictwa Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej

Laboratorium Szkoły Głównej Służby Pożarniczej

Laboratorium Collegium Mazovia

**Recenzenci**

**Prof. dr hab. inż. Andrzej Olszyna**

**Prof. dr hab. inż. Jarosław Rajczyk**