



Anna HALICKA, Paweł OGRODNIK, Bartosz ZEGARDŁO

ODPADY CERAMIKI SANITARNEJ JAKO KRUSZYWO DO BETONÓW W KONSTRUKCJACH O WYSOKICH WYMAGANIACH W ZAKRESIE BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO

Streszczenie:

W pracy ukazano wyniki eksperymentów i badań nad zastosowaniem odpadów ceramiki sanitarnej jako alternatywnego kruszywa do betonów specjalnych. Wykonane dotychczas prace badawcze autorów udowodniły, że skruszone odpady mogą spełniać funkcję kruszywa do betonów.

Praca niniejsza pokazuje kolejne badania betonu sporządzonego z użyciem kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej. Na podstawie ich wyników beton taki można zakwalifikować zarówno do betonów wysokowartościowych jak również do betonów, które mogą być stosowane w warunkach wysokich temperatur. Otrzymane parametry wytrzymałościowe betonu na kruszywie ceramicznym zarówno przed wygrzewaniem jak i po wygrzewaniu w temperaturze 1000°C przewyższyły parametry wygrzewanych betonów na kruszywach tradycyjnych. Tak przygotowane betony mogą być używane do wykonywania betonowych elementów tuneli i szybów podziemnych, narażonych na niebezpieczeństwo pożarowe.

WSTĘP

Wraz z rozwojem transportu drogowego obserwuje się znaczny postęp i zaawansowanie w technikach projektowania i wykonawstwa drogowych konstrukcji inżynierskich. Wiele z nich ze względu na usytuowanie oraz warunki pracy wymaga zastosowania materiałów spełniających specyficzne wymagania. Przykładem takich konstrukcji są tunele.

Są to budowle komunikacyjne wymagające szczególnego podejścia projektowego (obiekty podziemne narażone na znaczne obciążenia, w tym dynamiczne, a często także na napór wody gruntowej) jak i technologicznego (drażenie pod terenami zurbanizowanymi lub w terenach górskich). Powyższe wymagania stanowią o konieczności stosowania do ich wykonania betonów wysokowartościowych o wysokiej wytrzymałości i szczelności.

Szczególnym wymaganiem jest warunek bezpieczeństwa pożarowego. Oprócz sprawnie funkcjonujących systemów ewakuacji, wentylacji, alarmowych, ostrzegawczych itp. wymaga się od tworzących je elementów konstrukcyjnych wysokiej odporności pożarowej w zakresie nośności. Konstrukcja musi przenosić obciążenia przez czas pozwalający na ewakuację. Taką nośność w warunkach pożaru zapewnić może zastosowanie betonu odpornego na działanie wysokich temperatur.

Wyżej wymienione wymagania (wysokiej wytrzymałości oraz odporności pożarowej) stawiane są także materiałom konstrukcyjnym stosowanym do wykonywania obudów szybów kopalnianych [4].

1. CHARAKTERYSTYKA BETONÓW DO WYKONYWANIA TUNELI I SZYBÓW

1.1 Betony wysokowartościowe

Betony wysokowytrzymałe (wysokowartościowe BWW) są betonami cementowymi na kruszywach, głównie naturalnych, z odpowiednimi dodatkami i domieszkami. Wysoką wytrzymałość, szczelność betonu oraz dobrą urabialność świeżej mieszanki betonowej, utrzymywaną przynajmniej przez 1 godzinę uzyskuje się przez redukcję stosunku w/c przy zastosowaniu superplastyfikatorów, przez zoptymalizowanie wskaźnika kruszywo/spoiwo oraz uszczelnienie stosu okruszowego kruszywa fazą mikroziarnistą (najczęściej mikrokrzemionką). Wysokie mechaniczne właściwości betonu BWW wynikają z dużej jednorodności struktury, braku lokalnych osłabień w postaci porów powietrznych po wolnej wodzie oraz braku rys skurczowych. Beton wysokowartościowy charakteryzuje się wysoką trwałością związaną z bardzo niską nasiąkliwością, mrozoodpornością oraz wysoką wodoszczelnością. W normie [11] do betonów o wysokiej wytrzymałości kwalifikuje się betony o klasach powyżej C50/60.

1.2 Betony odporne na działanie wysokich temperatur

Graniczną, bezpieczną temperaturą, w której można stosować betony zwykle na cemencie portlandzkim jest 250⁰C [6]. 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 250⁰C) i ogniotrwałe pracujące w wysokich temperaturach (nawet 2000⁰C i większych). Literatura nie wyznacza ścisłej granicy temperaturowej pomiędzy żaroodpornością a ogniotrwałością betonów. Spotyka się tu wartości 1000⁰C [6], 1200⁰C lub nawet 1500⁰C. Betony żaroodporne i ogniotrwałe znajdują bardzo wiele zastosowań w różnych dziedzinach przemysłu. Przykładami będą tu konstrukcje obudów pieców przemysłowych, kominów, posadzki w odlewniach i wykładziny w wyżej wspomnianych piecach i kominach przemysłowych.

Odporność betonów na działanie wysokich temperatur zależy przede wszystkim od użytego spoiwa. Graniczne temperatury stosowania betonów z cementów portlandzkich w podwyższonych temperaturach wynikają z zachodzących podczas wygrzewania reakcji chemicznych (odparowanie wody nie związanej chemicznie w temp. około 150⁰C, odparowanie wody chemicznie związanej w temp. 550⁰C w, zamiana wiązań chemicznych na ceramiczne – około 1200⁰C). Szczególnie niekorzystny jest proces odparowania wody związanej chemicznie w wyniku przejścia wodorotlenku wapnia, wchodzącego w skład utworzonej podczas wiązania sieci krystalicznej, w wolne wapno, zdolne do samoczynnego powtórnego wiązania. Powtórne samoczynne wiązanie tlenu wapnia z wilgocią z powietrza jest reakcją, której towarzyszy niekontrolowany wzrost objętości skutkujący zmianami w strukturze betonu. Zmiany chemiczne prowadzą do spadku wytrzymałości betonu w miarę wzrostu temperatury wygrzewania. Dlatego w betonach pracujących w warunkach wysokich temperatur używa się spoiwa bardziej odpornego - cementu glinowego, który zawierając w swym składzie mniejsze ilości związków wapna jest znacznie bardziej odporny na działanie wysokich temperatur.

Na żaroodporność i ogniotrwałość betonów w dużej mierze wpływa kruszywo. Procesy fizykochemiczne zachodzące w ziarnach kruszywa podczas wygrzewania prowadzą do rozluźnienia struktury wewnętrznej betonu i w konsekwencji – do spadku wytrzymałości. Zakresy temperaturowe zastosowań różnych kruszyw oraz ich krótkie charakterystyki przedstawia Tab.1. Z danych normowych [11] wynika, że z betony na dwóch najbardziej popularnych grupach 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 1150⁰ C, a w 1300⁰ C następuje całkowite zniszczenie struktury.

Tab. 1. Zakresy temperaturowe stosowania różnych kruszyw [3]

Kruszywo	Temperatura graniczna, °C	Uwagi/charakterystyka
Piasek	350	Topi się w wyższych temperaturach
Wapień	500	wodorotlenek wapnia przechodzi w wolne wapno
Bazalt, granit	900	traci właściwości w wyższych temperaturach
Szamet	1400	uzyskiwany przez wypalenie kaolinu lub innych glin ogniotrwałych, główne składniki to krzemionka SiO ₂ i tlenek glinu Al ₂ O ₃
Korund	1900	zawiera 96-99% Al ₂ O ₃ ; duża wytrzymałość mechaniczna i odporność na środowisko agresywne
Magnezyt spiekany	2000	duża przewodność cieplna i współczynnik rozszerzalności cieplnej
Fosteryt	2000	uzyskiwany przez spieczenie fosterytu naturalnego
Karbokorund	Powyżej 2000	uzyskiwany przez spiekanie piasku z koksem; wysoka wytrzymałość mechaniczna i odporność na środowisko agresywne
Spiekane gliny, żuźle, keramzyt	1400	stosowane do betonów izolacyjnych o niskich wytrzymałościach, pracujących w wysokich temp.

Czynnikiem wpływającym na zachowanie się betonu podczas wygrzewania jest także 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).

2. CHARAKTERYSTYKA ODPADÓW CERAMICZNYCH I DOTYCHCZASOWE PROBY ICH WYKORZYSTANIA JAKO KRUSZYWA DO BETONÓW

Pojęciem *ceramika* określa się różnorodne wyroby, które powstają z gliny. Zarówno zawartości procentowe składników jak i parametry technologiczne (np. temperatura wypalania) wpływają na właściwości zarówno chemiczne i fizyczne ceramiki. W Tab.2 przedstawiono składy chemiczne różnych wyrobów ceramicznych.

Zagadnienie wykorzystania odpadów ceramiki jako kruszywa do betonów pojawia się w nielicznych publikacjach obcojęzycznych [1-5]. Wskazują one na największe korzyści płynące z użycia ceramiki szlachetnej. Badania wytrzymałościowe betonów z dodatkiem kruszyw z ceramiki czerwonej wskazywały na obniżenie parametrów wytrzymałościowych w porównaniu z mieszankami na kruszywach tradycyjnych (obniżenie o ok. 40% wytrzymałości na ściskanie oraz 26% wytrzymałości na rozciąganie [5]). Betony z dodatkiem kruszyw z ceramiki szlachetnej jak np. ceramiczne izolatory elektryczne [1] nie wykazywały różnic w parametrach wytrzymałościowych w porównaniu z wysokiej jakości betonami wykonanymi na kruszywie kamiennym.

Tab.2 Składy chemiczne przykładowych odpadów ceramicznych [9]

Rodzaj ceramiki	Udział procentowy składnika							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
z czerwonych glin dwukrotnie wypalanych	51,7	18,2	6,1	6,1	2,4	0,2	4,6	0,8
z białych glin jednokrotnie wypalanych	58,0	18,0	1,0	8,3	0,6	0,2	1,2	0,8
z białych glin dwukrotnie wypalanych	59,8	18,6	1,7	5,5	3,5	1,6	2,5	0,4
płytki grysowe z glin czerwonych	29,1	20,3	7,7	1,2	1,1	0,4	4,2	0,9
płytki gresowe z glin białych	65,0	21,3	1,3	0,2	0,3	2,5	3,7	0,2
ceramika sanitarna	65,8	22,2	0,6	0,1	0,1	1,0	3,5	0,3

3. BADANIA WŁASNE

3.1. Skład betonu i sposób wytworzenia kruszywa

Analizując skład chemiczny ceramiki sanitarnej (p.2) stwierdzono, że zawiera w ona znaczne ilości związków glinowych, podobnie jak wykorzystywany w betonach żaroodpornych cement glinowy. Podobną bliskość chemiczną ceramiki sanitarnej oraz cementu glinowego można zauważyć w stosunkowo niskiej zawartości tlenku wapnia - cementy glinowe zawierają go najmniej w porównaniu z innymi cementami. Obserwacje te były podstawą do podjęcia próby wykonania betonu na cemencie glinowym i kruszywie z odpadów ceramiki sanitarnej i postawienia tezy, że taki beton będzie w warunkach wysokich temperatur zachowywał się lepiej niż beton na kruszywach tradycyjnych.



Rys.1 Kruszywo z ceramiki sanitarnej frakcji 4-8 mm

Kruszywo użyte do badań własnych zostało przygotowane na bazie poprodukcyjnych odpadów ceramiki sanitarnej [3]. Do przygotowania kruszywa zastosowano kruszarki szcękowe, pozwalające na wydrębnienie:

1. Frakcji "drobnej" $0 \div 4$ mm, która przechodziła przez sito o oczku 4 mm,

2. Frakcji "grubej" 4 ÷ 8 mm tj ziaren, które pozostawały na sicie o oczku 4 mm, ale przechodziły przez sito o oczku 8 mm (Rys.1); kruszywo grubsze, które pozostawało na sicie 8 mm trafiło powtórnie do kruszarki.

Zaprojektowano beton na cemencie glinowym o zawartości 70% tlenku glinu oraz kruszywie ceramicznym. Jego skład został przedstawiony w Tab.3. Mieszanka betonowa o tym składzie charakteryzowała się konsystencją S2, dawała się łatwo zagęszczać przez wibrowanie, a uzyskany beton był nieporowaty.

Tab. 3. Skład badanego betonu

Składnik	Ilość składnika [kg/m ³]
Cement glinowy	493,38
Kruszywo frakcji 0-4 mm	991,37
Kruszywo frakcji 4-8 mm	396,55
Woda	201,38

3.2. Badania wytrzymałości betonu na kruszywie ceramicznym

Badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie betonów o składzie jak w tab.2 wykonano na próbkach pryzmatycznych o wymiarach 40 x 40 x 160 mm, ze względu na to, że granulacja użytego kruszywa nie przekraczała 8 mm, a kruszywo granulacji poniżej 4 mm stanowiło więcej niż 70% całego kruszywa, Dla celów porównawczych sporządzono również próbki z betonu na cemencie portlandzkim i kruszywie żwirowym.

Próbki po jednej dobie od zaformowania i zagęszczenia rozformowano. Przez 30 dni poddawano je pielęgnacji wilgotnościowej w temperaturze 150°C, a następnie po kolejnych 7 dniach poddano badaniom. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono przy użyciu prasy hydraulicznej ADWANTEST 9 firmy CONTROLS.

Wyniki badań wytrzymałościowych przedstawiono w Tab.4. Pozwoliły one stwierdzić, że beton na kruszywie ceramicznym nie ustępuje wytrzymałością betonowi na kruszywie żwirowym. Beton z kruszywem ceramicznym, zarówno na cemencie portlandzkim, jak i glinowym, miał wyższe wytrzymałości na ściskanie (o około 10%) i na rozciąganie niż beton na kruszywie żwirowym. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu na kruszywie ceramicznym wynosiła 90,54 MPa, a na rozciąganie 9,56 MPa.

Tab. 4. Wyniki badań wytrzymałościowych betonów na kruszywie z odpadów ceramiki sanitarnej w porównaniu z betonami na kruszywie tradycyjnym.

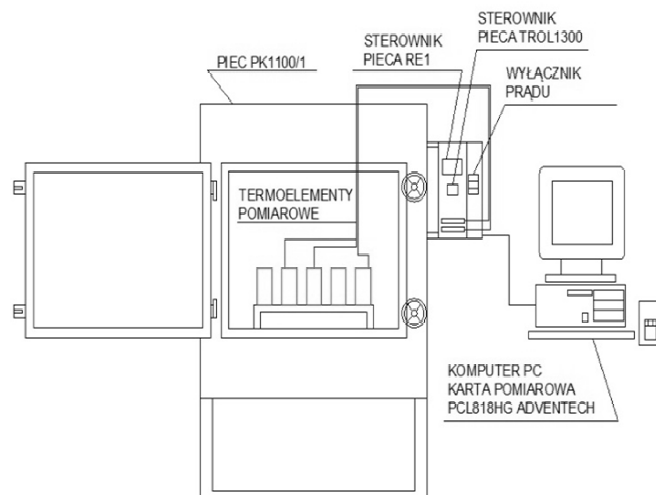
	Liczba próbek	Wytrzymałość średnia [MPa]	Wskaźnik zmienności [%]
Beton na cemencie portlandzkim z kruszywem żwirowym			
na ściskanie	3	42,8	8,36
na rozciąganie przy zginaniu	3	6,35	9,64
Beton na cemencie portlandzkim z kruszywem ceramicznym			
na ściskanie	3	46,95	2,44
na rozciąganie przy zginaniu	3	6,52	6,35
Beton na cemencie glinowym z kruszywem żwirowym			
na ściskanie	6	80,4	5,31
na rozciąganie przy zginaniu	3	7,2	10,05
Beton na cemencie glinowym z kruszywem ceramicznym			
na ściskanie	6	90,54	2,41
na rozciąganie przy zginaniu	3	9,56	4,99

3.3. Badanie betonu wykonanego na bazie ceramiki sanitarnej jako betonu odpornego na wysokie temperatury

3.3.1 Stanowisko badawcze

Proces wygrzewania próbek zaprogramowany został na stanowisku badawczym (rys.2), którego główny człon stanowił średniotemperaturowy piec komorowy typu PK1100/1.

a)



b)



Rys. 2 Stanowisko do wygrzewania próbek: a) schemat, b) piec z próbkami

3.3.2 Przebieg badań

Program prac badawczych zakładał wykonanie dwu serii badań. W pierwszej serii próbki poddawane były obciążeniu temperaturowemu w sposób szybki, drugi prowadzony był w sposób normowy przez wolniejsze, ale kilkukrotne wygrzewanie. W pierwszej serii badań zastosowano ośmiogodzinny cykl wygrzewania. Przed wygrzewaniem próbki wstępnie wysuszono w suszarce laboratoryjnej (dochodzenia do temperatury 250°C przez 4 godziny oraz przebywanie w temp. 250°C przez kolejne 4 godziny). Cykl wygrzewania próbek w piecu ustalono w następujący sposób:

1. Dochodzenie do temperatury 150°C przez 2 godziny,
2. Utrzymanie temperatury 150°C przez 1 godzinę,
3. Dochodzenie do temperatury 550°C przez 2 godziny,
4. Utrzymanie temperatury 550°C przez 1 godzinę,

5. Dochodzenie do temperatury 1000°C przez 1,5 godziny,
6. Utrzymanie temperatury 1000°C przez 0,5 godziny.

Próbki po wygrzewaniu pozostały w zamkniętym piecu do jego całkowitego ostygnięcia. Po otwarciu pieca i usunięciu osłon bez dotykania próbek dokonano oględzin próbek dokumentowanych fotograficznie. Po ostygnięciu, wykonano badania wytrzymałościowe.

W drugiej serii badań wykonano próbki jedynie na cemencie glinowym, ale z różnymi kruszywami. Cykl ich wygrzewania odbywał się według następującego schematu:

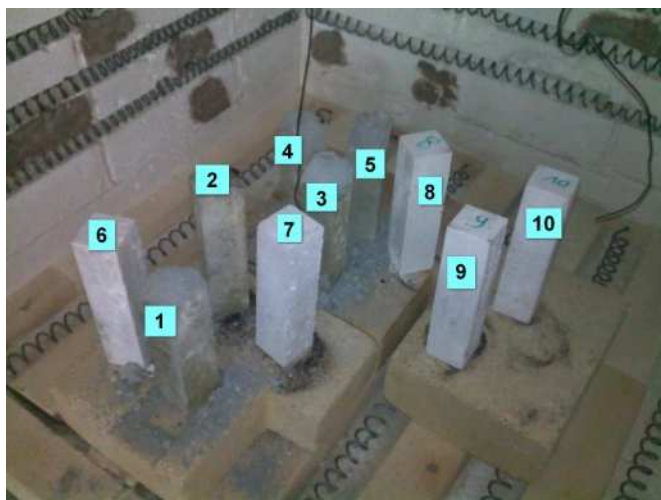
- I. Przygotowanie – przetrzymywanie w temperaturze normalnej przez 7,
- II. Wprowadzenie do pracy w wysokiej temperaturze:
 1. dochodzenie do temperatury 110°C przez 5 godzin,
 2. suszenie w temperaturze 110°C przez 32 godziny,
 3. dochodzenie do temperatury 150°C przez 2 godziny,
 4. utrzymywanie w temperaturze 150°C przez 7 godzin,
 5. dochodzenie do temperatury 1000°C przez 10 godzin,
 6. utrzymywanie w temperaturze 1000°C przez 4 godziny
 7. studzenie do temperatury pokojowej razem z piecem
- III. Wygrzewanie właściwe – powtórzenie 5 razy następującego cyklu:
 1. dochodzenie do temperatury 150°C przez 10 godzin,
 2. utrzymywanie w temperaturze 150°C przez 7 godzin,
 3. dochodzenie do temperatury 1000°C przez 10 godzin,
 4. utrzymywanie w temperaturze 1000°C przez 4 godziny
 5. studzenie do temperatury pokojowej razem z piecem.

Po otwarciu pieca i usunięciu osłon bez dotykania próbek dokonano oględzin próbek dokumentowanych fotograficznie.

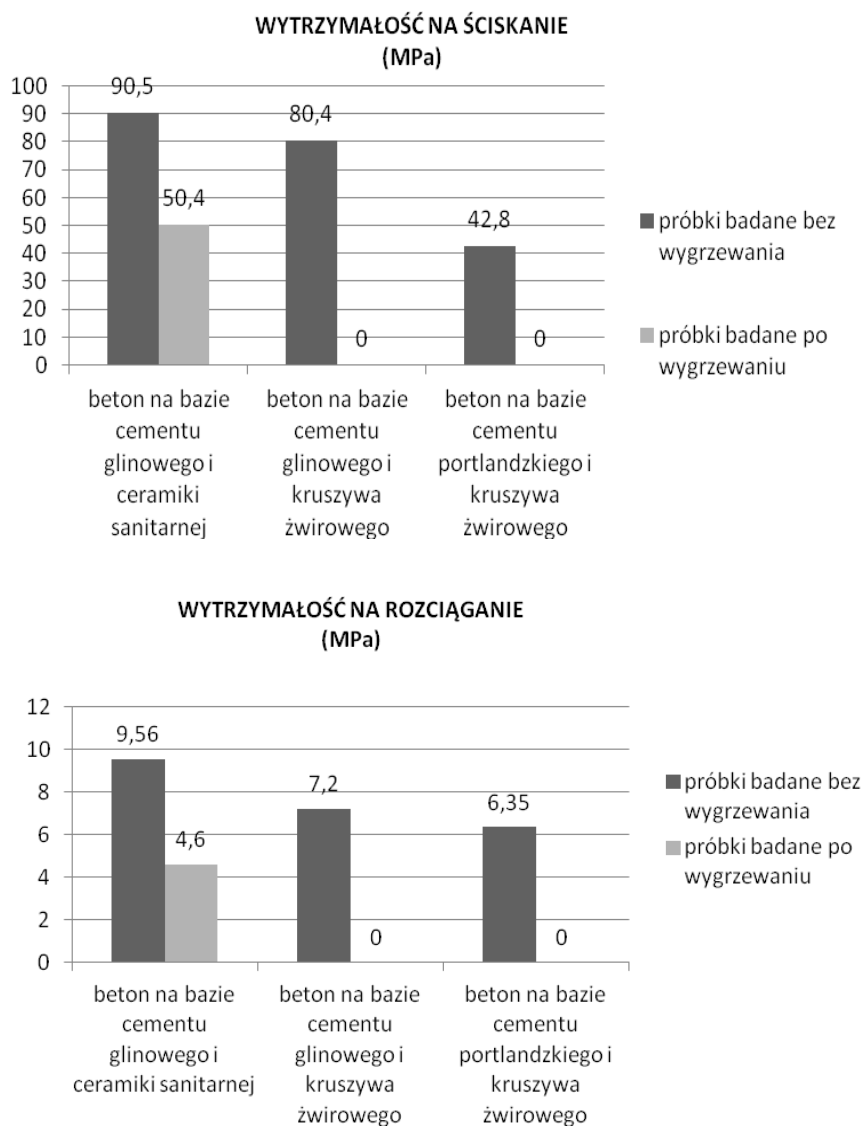
3.3.3 Wyniki badań

Pierwsza seria badań

W pierwszej serii zbadano: próbki z betonu na cemencie glinowym z kruszywem z ceramiki sanitarnej oraz próbki porównawcze: z betonu na cemencie portlandzkim i kruszywie żwirowym, z betonu na cemencie glinowym i kruszywie żwirowym [7]. Wszystkie próbki sporządzone były z betonu o składzie podanym w Tab. 2.



Rys. 3 Próbki pierwszej serii badań po wygrzewaniu -próbki na cemencie portlandzkim: 1-5, 6-10- próbki wykonane na bazie cementu glinowego



Rys. 4. Wyniki badań wytrzymałościowych próbek niewygrzewanych i wygrzewanych

Po wyjęciu próbek z pieca stwierdzono, co następuje (rys.3):

- próbki na cemencie portlandzkim podczas wygrzewania uległy wyraźnym uszkodzeniom polegającym na wykruszeniu około 20% masy materiału w górnych częściach beleczek,
- próbki na cemencie glinowym i tradycyjnym kruszywie żwirowym po wyjęciu z pieca nie miały śladów uszkodzeń, jednak po kilku dniach od wygrzewania w ich górnych częściach pojawiły się pęknięcia, a po 7 dniach górne części próbek zaczęły się samoczynnie wykruszać,
- próbki na cemencie glinowym i kruszywie ceramicznym pozostały nienaruszone zarówno po wyjęciu z pieca, jak i przez okres najbliższego miesiąca.

Po 30 dniach od wyjęcia z pieca przeprowadzono badania wytrzymałościowe, których wyniki pokazano na rys.4. Wynika z nich, że beton na cemencie glinowym i kruszywie ceramicznym pomimo około 50% spadku wytrzymałości, po wygrzewaniu wciąż charakteryzował się wysoką wytrzymałością zarówno na ściskanie jak i rozciąganie. Pozostałych próbek, ze względu na zniszczenia nie udało się zbadać.

Druga seria badań

W drugiej serii badań próbki betonu na cemencie glinowym i kruszywach: granatowym, ceramicznym oraz tradycyjnym żwirowym przy czym skład wszystkich próbek był zgodny z tab.2. Wykonano po trzy próbki z każdym rodzajem kruszywa.

Wszystkie próbki bezpośrednio po wyjęciu z pieca nie wykazywały śladów uszkodzeń. Próbki pozostawiono w laboratorium w normalnych warunkach ciepłno-wilgotnościowych. Po 30 dniach stwierdzono, że próbki z kruszywem żwirowym utraciły spójność, a przy próbie poruszenia nastąpiło wykruszenie około 40% masy próbki. Na próbkach z betonu z kruszywem granitowym widać było wyraźne ślady spękań i zarysowań oraz drobne ubytki masy. Próbki z kruszywem ceramicznym pozostały spójne i bez ubytków.



Rys. 5. Próbki drugiej serii badań 30 dni po wygrzewaniu; próbki z betonu od lewej: na kruszywie żwirowym, na kruszywie granitowym, na kruszywie z odpadów ceramiki sanitarnej

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły możliwość zastosowania kruszywa ceramicznego do betonów wysokowytrzymałych pracujących w warunkach wysokich temperatur. Próbki sporządzone na bazie cementu glinowego i kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej charakteryzowały się wysoką wytrzymałością, a po wygrzewaniu w temperaturze 1000⁰C nie zmieniły swojej struktury i wykazywały nadal dość wysoką wytrzymałość.

Zatem betony na cemencie glinowym z kruszywem z odpadów ceramiki sanitarnej można rekomendować do użycia w budowlach inżynierskich, w których prócz wysokich wytrzymałości wymagana jest odporność na wysokie temperatury. Szczególnym zastosowaniem mogą tu być budowle inżynierii komunikacyjnej (tunele) oraz szyby kopalniane.

SANITARY CERAMIC WASTES AS AN AGGREGATE IN CONCRETE CONSTRUCTIONS WITH HIGH FIRE SAFETY REQUIREMENTS

Abstract

This work presents experimental results and studies on the application of sanitary ceramic wastes as an alternative aggregate to special concrete. Studies carried out so far have proved that the shredded waste can fulfil the function of aggregates in concrete.

This article shows further studies on concrete made from sanitary ceramic wastes. Based on the results, concrete can be classified both as high value and high temperature resistant one. Strength parameters obtained before and after heating at 1000°C for ceramic aggregates have been higher than for concrete with traditional aggregates. Concrete made this way can be used to underground tunnel and shaft elements which are exposed to fire danger.

BIBLIOGRAFIA

1. De Brito J., Pereira A.S., Correia J.R.: *Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates* Cement and Concrete Composites 27 (2005) 429-433.
2. Guerra I., Vivar I., Llamas B., Juan A., Moran J.: *Eco-efficient concretes: The effect of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete* Waste management 29 (2009) 643-646.
3. Halicka A., Zegardło B.: *Odpady ceramiki sanitarnej jako kruszywo do betonu*, Przegląd Budowlany 7-8/2011.
4. Hydzik J., Jednacz P.: *Betony wysokowartościowe – zakres możliwych zmian w obudowach szybów w oparciu o zasady projektowania wg PN-G-05015:1997* AGH, Kraków 2001.
5. Lopez V., Llamas B., Juan A., Moran J.M., Guerra I.: *Eco-efficient Concretes: Impact of the Use of White Ceramic Powder on the Mechanical Properties of Concrete*. Biosystems Engineering (2007) 96(4), 559-564.
6. Montgomery R.: *Advanced Concrete Technology*, Elsevier 2006.
7. Ogrodnik P., Zegardło B., Halicka A.: *Wstępna analiza możliwości zastosowania odpadów ceramiki sanitarnej w funkcji kruszywa do betonów pracujących w warunkach wysokich temperatur*, Bezpieczeństwo i technika pożarowa 1/2012.
8. Pacheco-Torgal, S. Jalali: *Reusing ceramic wastes in concrete*: Construction and Building Materials 24 (2010) 832-838.
9. Senthamarai R.M., Devadas P., Manoharan, D. Gobinath: *Concrete made from ceramic industry waste: Durability property*. Construction and Building Materials 25 (2011) 2413-2419.
10. PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
11. Eurokod 2 – 1-2 Projektowanie konstrukcji z betonu. Zasady ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Anna HALICKA prof. PL – Politechnika Lubelska
dr inż. Paweł OGRODNIK – Szkoła Główna Służby Pożarniczej
mgr inż. Bartosz ZEGARDŁO – Collegium Mazovia w Siedlcach