



MIDDLE POMERANIAN SCIENTIFIC SOCIETY OF THE ENVIRONMENT PROTECTION
ŚRODKOWO-POMORSKIE TOWARZYSTWO NAUKOWE OCHRONY ŚRODOWISKA

Annual Set The Environment Protection
Rocznik Ochrona Środowiska

Volume/Tom 15. Year/Rok 2013

ISSN 1506-218X

2003–2021

Badania wybranych właściwości kruszyw z odpadów ceramicznych oraz betonu wytworzonego z ich udziałem

Tomasz Gawenda

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Zdzisław Naziemiec

Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Kraków

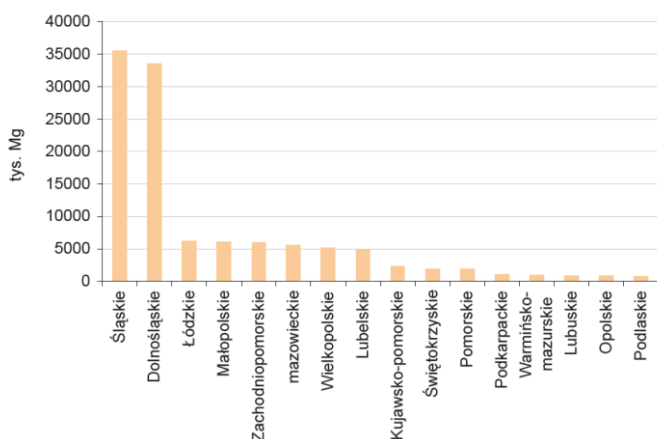
Alina Walerak

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

1. Wstęp

W 2010 roku w Polsce wytworzonych zostało ogółem 113,5 mln ton odpadów przemysłowych, co stanowi ponad 90% całkowitej ilości odpadów powstających w naszym kraju. Do tak dużego poziomu często przyczynia się nieprawidłowa gospodarka odpadami w zakładach produkcyjnych i brak działań związanych z ich zagospodarowywaniem. W efekcie następuje zanieczyszczenie środowiska naturalnego, które negatywnie wpływa na zdrowie ludzi. W 2010 roku na terenie kraju najwięcej odpadów powstało w województwie śląskim i dolnośląskim (rys. 1). Liczba odpadów w tych rejonach jest sześciokrotnie większa, niż w innych województwach charakteryzujących się przeciętną produkcją odpadów przemysłowych (np. łódzkim, mazowieckim, małopolskim). Najmniejsza natomiast liczba odpadów powstawała w województwach: podkarpackim, warmińsko-mazurskim, lubelskim, opolskim i podlaskim [19, 20].

Interesującym materiałem należącym do odpadów przemysłowych są, ze względu na swoje właściwości, odpady wyrobów ceramicznych.



Rys. 1. Ilość odpadów przemysłowych wytworzonych w Polsce w 2010 r. [20]
Fig. 1. Production of industrial waste in Poland in 2010 [20]

Do omawianej grupy zaliczane są, zgodnie z „Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 roku w sprawie katalogu odpadów” następujące rodzaje odpadów:

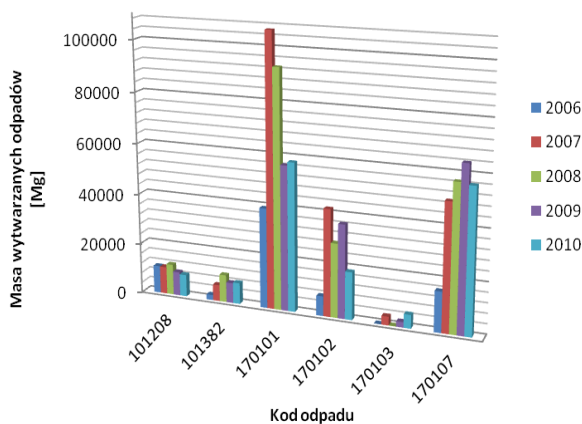
- wybrakowane odpady ceramiczne, cegły, kafle i ceramika budowlana (kod odpadu 10 12 08),
- wybrakowane wyroby (kod odpadu 10 13 82),
- odpady betonu oraz gruz z remontów i rozbiórek (kod odpadu 17 01 01),
- gruz ceglany (kod odpadu 17 01 02),
- odpady innych materiałów ceramicznych i elementów wyposażenia (kod odpadu 17 01 03),
- zmieszane odpady betonu, gruzu ceglano-ceramicznego, odpadowych materiałów ceramicznych i elementów wyposażenia nie zawierające substancji niebezpiecznych (kod odpadu 17 01 07) [5,19].

Są to zatem zarówno odpady powstające podczas remontów budynków mieszkalnych, budynków użyteczności publicznej, powstałe na skutek remontów lub wyburzeń, odpady wytwarzane w miejscach produkcji wyrobów ceramicznych, czyli wadliwe odpady poprodukcyjne i o mniejszym znaczeniu odpady związane z użytkowaniem wyrobów ceramicznych w życiu codziennym (stłuczka ceramiczna). Sektory przemysłu ceramicznego specjalizują się wytwarzaniem różnorodnych wyro-

bów ceramicznych, które po zakończeniu cyklu życia, a następnie po zgromadzeniu ich mogą stać się cennym źródłem kruszyw. Należą do nich: płytki ścienne i podłogowe, cegły i dachówki, rury kamionkowe, ceramiczne artykuły gospodarstwa domowego, wyroby ogniotrwałe, wyroby sanitarne, ceramika techniczna, kruszywa lekkie ceramiczne [5].

Wprowadzanie innowacyjnych rozwiązań, m.in. w zakresie ochrony środowiska, wdrażanie wymogów najlepszych dostępnych technik są jednymi z głównych czynników wpływających na ilość wytwarzanych odpadów. Literatura [5, 20, 21] podaje, że największy udział mają odpady betonu, gruz z remontów i rozbiórek oraz gruz betonu. W okresie od 2006 do 2010 roku zaobserwowano wzrost analizowanych ilości odpadów (rys. 2) [21].

Dążąc do poprawy sytuacji i zmniejszenia ilości produkowanych odpadów wyrobów ceramiki, należy przede wszystkim zapobiegać nieracjonalnemu gospodarowaniu odpadami. Doskonałą alternatywą dla składowania odpadów jest ich przetwarzanie, a następnie wykorzystanie w postaci kruszywa jako dodatek do betonu oraz w budownictwie drogowym [5, 19], podobnie jak ma to miejsce w zagospodarowaniu odpadów przywęglowych [3, 18].



Rys. 2. Zestawienie wytwarzanych odpadów wyrobów ceramiki w woj. małopolskim w latach 2006–2010 [21]

Fig. 2. Ceramic waste production in Malopolska area in the period 2006–2010 [21]

Innym zagadnieniem jest krajowa gospodarka kruszywami. Beton jest najpowszechniej stosowanym materiałem budowlanym. W betonie kruszywa grube (żwirry lub kruszywa łamane) i drobne (piaski) stanowią około 70% jego masy. Proporcja kruszywa grubego do drobnego w betonie zwykłym wynosi około 2:1 [8]. W Polsce zdecydowana większość zakładów wydobywania i produkcji kruszyw grubych znajduje się na południu kraju. W związku z tym w pasie środkowym i na północy kraju występuje deficyt kruszyw gruboziarnistych łamanych. Zakłady ceramiki budowlanej są w przybliżeniu równomiernie rozmieszczone na terenie naszego kraju. Odpady ceramiki odzyskiwane jako kruszywo grube, mogą więc stanowić uzupełnienie lokalnych deficytów kruszyw gruboziarnistych.

2. Metodyka przeprowadzonych badań laboratoryjnych – charakterystyka nadawy

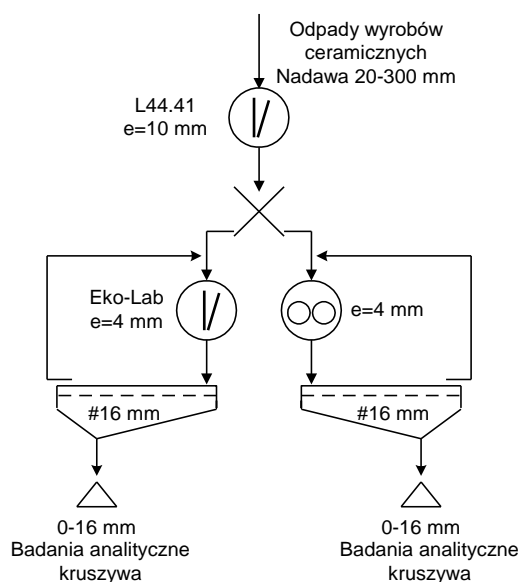
Szukając alternatywy dla składowania odpadów ceramicznych przeprowadzono szczegółowe badania, w których wykorzystano odpady wyrobów ceramicznych pochodzących z firmy produkującej płytki ceramiczne [5, 19]. Ze względu na trudności produkcyjne oraz rygorystyczne wymogi kontroli jakości, duża część wyrobów ceramicznych zostaje zakwalifikowana jako odpad poprodukcyjny. Najczęściej spotykanymi wadami dyskwalifikującymi wyroby są pęknięcia, szczyrby, uszkodzenia szkliska itp.

Zdeponowane odpady płytek ceramicznych (rys. 3) użyte do badań laboratoryjnych charakteryzowały się uziarnieniem w zakresie 20–300 mm i 100% udziałem ziaren nieforemnych.

Przedstawiony na rysunku 3 materiał rozdrobniono, a uzyskany produkt poddano ocenie jakościowej kruszyw ceramicznych. Pierwszy etap badań został przeprowadzony w laboratorium Katedry Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców AGH w Krakowie. Polegał on na rozdrabnianiu odpadów w dwustadialnych układach technologicznych i klasyfikacji wg schematu zaprezentowanego na rysunku 4. W tym celu wykorzystano doświadczalną kruszarkę szczękową przemysłową (typu L44.41) o ruchu złożonym szczęki (rys. 5), laboratoryjną kruszarkę szczękową (Eko-Lab) (rys. 6 z prawej) również o ruchu złożonym szczęki i laboratoryjną dwuwalcową kruszarkę o walcach gładkich (rys. 6 z lewej), a także przesiewacz wahadłowy krzywkowy z zestawem analitycznych sit kontrolnych.



Rys. 3. Odpady wyrobów płytek ceramicznych, fot. A. Walerak
Fig. 3. Waste from ceramic tails production (photo: A. Walerak)



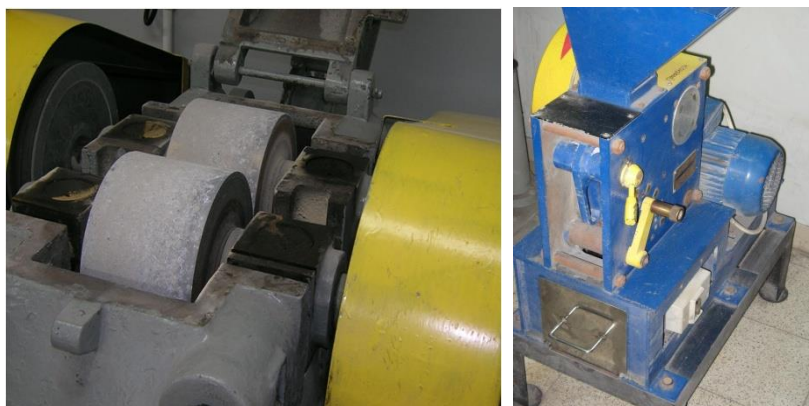
Rys. 4. Schemat technologiczny rozdrabniania i klasyfikacji odpadów wyrobów ceramicznych [5]

Fig. 4. The ceramic waste crushing and classification circuit [5]



Rys. 5. Komora robocza oraz ogólny widok doświadczalnej kruszarki szczękowej L44.41 produkcji Makrum S.A., fot. T. Gawenda

Fig. 5. Working chamber and a general view of L44.41 jaw crusher, manufactured in Makrum (photo: T. Gawenda)



Rys. 6. Laboratoryjna kruszarka dwuwalcowa (z lewej) i szczękowa firmy Eko-Lab (z prawej), fot. T. Gawenda

Fig. 6. Laboratory roll crusher (left) and the jaw crusher manufactured by Eko-Lab (right) (photo: T. Gawenda)

Kruszarka szczękowa pracowała na pierwszym stadium rozdrabniania w układzie otwartym przy szczelinie wylotowej 10 mm, natomiast na drugim stadium obie kruszarki pracowały w układzie zamkniętym przy jednakowych szczelinach wylotowych 4 mm, co dało możliwość porównania wyników między sobą. Produkty większe od 16 mm uzyska-

ne po kruszeniu w obu kruszarkach były odsiewane w przesiewaczu i zawracane do ponownego przekruszenia. Zgodnie z literaturą [4, 6, 17] rozdrabnianie i klasyfikacja prowadzona w obiegu zamkniętym przynosi korzyści w postaci uzyskiwanych produktów o polepszonej jakości (mniejsza zawartość ziaren nieforemnych i podatność na rozdrabnianie) oraz mniejszego zużycie energii. Produkt po pierwszym stadium kruszenia (rys. 7 z lewej) oraz produkty końcowe 0–16 mm (rys. 7 z prawej) były poddane analizom efektów rozdrabniania.

Drugi etap badań przeprowadzony w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie polegał na ocenie jakościowej kruszyw ceramicznych, a w szczególności określeniu nasiąkliwości, odporności na rozdrabnianie, mrozoodporności i gęstości objętościowej, a następnie sporządzeniu z tych kruszyw mieszanki betonowej przy uwzględnieniu właściwej proporcji klas 0–2, 2–4, 4–8 i 8–16 mm. Dla porównania cech jakościowych betonu z udziałem kruszyw sztucznych sporządzono również beton z udziałem kruszywa wyprodukowanego z wapienia dewońskiego. Badano cechy świeżego betonu (opad stożka, gęstość, zawartość powietrza, stosunek wody do cementu), a także parametry jakościowe betonów (wytrzymałość na ściskanie przed i po zamrażaniu, nasiąkliwość, mrozoodporność).



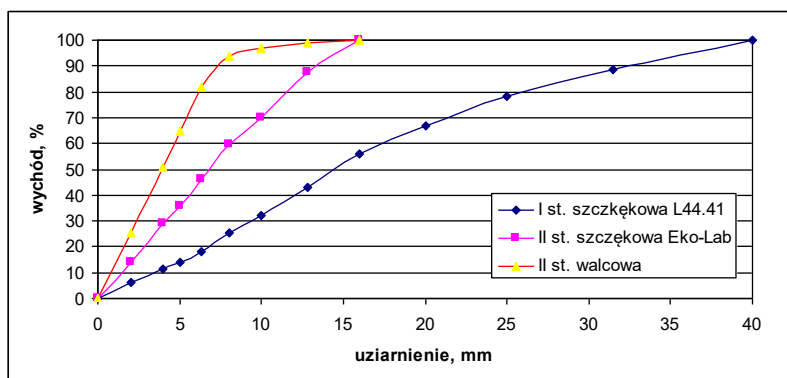
Rys. 7. Produkt po I stadium (z lewej) i po II stadium kruszenia (z prawej),
fot. A. Walerak

Fig. 7. The first stage (left) and second stage (right) crushing products
(photo: A. Walerak)

3. Właściwości geometryczne kruszyw ceramicznych - analiza efektów rozdrabniania

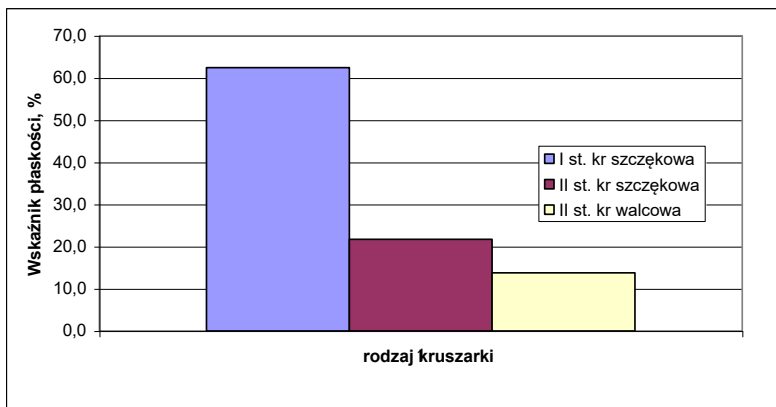
Uzyskane produkty rozdrabniania poddano analizie granulometrycznej oraz zawartości ziaren nieforemnych na sitach szczełinowych. Metoda oznaczania kształtu ziaren za pomocą wskaźnika płaskości FI oparta jest na PN-EN 933-3:1999 Badania geometrycznych właściwości kruszyw [16].

Na podstawie badań analitycznych sporządzono wykresy pozwalające ocenić efekty rozdrabniania w różnych kruszarkach i układach rozdrabniania. Produkt po I stadium kruszenia charakteryzował się uziarnieniem 0–40 mm oraz największą zawartością ziaren nieforemnych (63%), natomiast produkty po II stadium kruszenia uziarnieniem 0–16 mm, przy czym kruszywa po kruszarce walcowej posiadały większy udział ziaren drobnych oraz mniejszą zawartość ziaren nieforemnych (14%), niż w kruszarce szczękowej (22%) (rys. 8, 9). Wychód klasy 0–2 mm po kruszarce walcowej wyniósł ok. 25% i był dwukrotnie większy od wychodu tej klasy w kruszarce szczękowej.



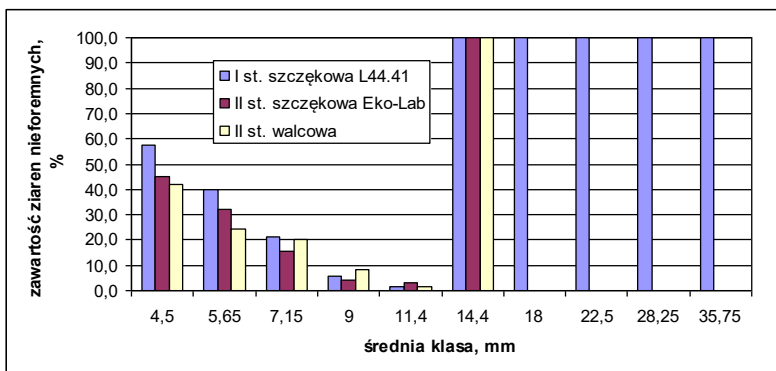
Rys. 8. Krzywe składu ziarnowego produktów uzyskanych po I i II stadium kruszenia

Fig. 8. Particle size distribution curves of the products from the first and second crushing stage



Rys. 9. Wskaźnik płaskości *FI* w zależności od rodzaju kruszarki
Fig. 9. The flatness index *FI* in relationship to the crusher type

Największą zawartością ziaren nieforemnych wynoszącą 100% charakteryzują się frakcje grubsze (>16 mm), natomiast najmniejszy udział ziaren nieforemnych posiadają klasy od 8 do 12,8 mm – do kilku procent (rys 10). Uzyskane kruszywo po kruszarce I stadium rozdrabniania posiada wszystkie ziarna nieforemne w grubszych klasach powyżej 16 mm.



Rys. 10. Zawartość ziaren nieforemnych dla średnich klas ziarnowych w produktach kruszenia uzyskanych po I i II stadium kruszenia
Fig. 10. The irregular particle content for average size particle fractions in crushing products from first and second crushing stage

Efekt taki wynika z trudności w zmianie kształtu ziaren płaskich podczas rozdrabniania w przypadku, gdy nadawę stanowią płytki ceramiczne (grupowe rozdrabnianie ziarn płaskich).

Analizując produkty rozdrabniania obserwuje się, że najmniejszą zawartością ziaren nieforemnych charakteryzuje się kruszywo uzyskane w kruszarce walcowej. W najdrobniejszych klasach (4–5 mm) ich zawartość wynosiła 42% i wraz ze wzrostem uziarnienia ulegała pomniejszeniu, w klasie 10–12,8 mm zawartość ziaren nieforemnych wynosiła 1,4% (rys. 11). W najgrubszej klasie ziarnowej 12,8–16 mm wszystkie ziarna były nieforemne. Przyczyną może być brak oddziaływania elementów roboczych na płaskie ziarna nadawy, tzn. szczelina wylotowa (powiększona dodatkowo o skok szczęki w kruszarce szczękowej) była większa od grubości płytki.

Stopień rozdrobnienia 90-cio procentowy był największy i zarazem nietypowy dla produktu uzyskanego po pierwszym stadium rozdrabniania. Dla badanego kruszywa ceramicznego stopień ten wyniósł 7,5, kiedy zwykle dla kruszarek szczękowych nie przekracza 4,5. Przyczyną tego zjawiska jest kształt ziaren nadawy. Ziarna przechodzące przez szczelinę wylotową kruszarki posiadały przynajmniej jeden wymiar mniejszy od sumy wielkości szczeliny i skoku szczęki, natomiast kruszywo przechodzące przez sito kontrolne musi cechować się co najmniej dwoma wymiarami mniejszymi od rozmiaru oczka sita. Analizując drugie stadium rozdrabniania, największy stopień rozdrobnienia 4,4 dla 90-cio procentowego ziarna otrzymano dla kruszarki walcowej, a dla kruszarki szczękowej uzyskano 2,4.

Zgodnie z literaturą [6–8] kształt ziaren ma wpływ na właściwości fizyko-mechaniczne kruszywa, co z kolei wpływa na jakość betonu (zużycie cementu, urabialność zaczynu, wytrzymałość betonu, mrozoodporność itp.), dlatego ilość ziaren nieforemnych w kruszywach powinna być jak najmniejsza. Zaobserwowano, że wartość wskaźnika płaskości jest uzależniona od grubości nadawy oraz od ilości stadiów kruszenia. Na drugim stadium rozdrabniania efektywniejszym urządzeniem okazała się kruszarka walcowa. Uzyskano w niej produkt o najniższej zawartości ziaren nieforemnych ok. 14%.

4. Parametry jakościowe kruszyw ceramicznych

Jakość i dalsze wykorzystanie kruszyw ceramicznych zależy od wielu czynników. Do najważniejszych cech kruszyw należy ich odporność na rozdrabnianie określana w bębnie Los Angeles, mrozoodporność, skład ziarnowy oraz kształt ziaren. Dla najwyższych marek betonu wymagane jest kruszywo o kategorii mrozoodporności F_1 (ubytek masy po 10 cyklach zamrażania i rozmrażania wynosi $\leq 1\%$). Zależnie jednak od przeznaczenia betonu oraz kategorii drogi i rodzaju warstwy drogi, w którą ma być wbudowane kruszywo, stosuje się kruszywa o kategorii od F_1 do F_{10} . Wymagania dotyczące mrozoodporności kruszyw podane są zwykle w odpowiednich wymaganiach technicznych. Odporność na rozdrabnianie zależy od parametrów wytrzymałościowych surowca, z którego uzyskano kruszywo i od kształtu ziaren kruszywa. Norma PN-EN 12620 *Kruszywa do betonu* [14] wyróżnia kilka kategorii odporności na rozdrabnianie w zakresie LA_{15} – LA_{50} . Kategorie odporności na rozdrabnianie LA_{15} – LA_{25} odpowiadają kruszywom uzyskanym ze skał zwięzłych, zawierających niewielką ilość ziaren nieforemnych. Przykładowo, w budownictwie drogowym do mieszanek mineralno-asfaltowych stosowane są kruszywa posiadające kategorię odporności na rozdrabnianie LA_{20} (drogi o kategorii ruchu KR 5–6), LA_{25} (drogi o kategorii KR 3–4) i LA_{30} (drogi o kategorii KR 1–2). Na warstwy podbudowy stosowane są kruszywa o niższej odporności na rozdrabnianie np. LA_{40} [14,19].

Ważną cechą kruszyw jest kształt ziaren określany jako wskaźnik płaskości lub wskaźnik kształtu. Dla najwyższych kategorii wskaźnika płaskości FI i wskaźnika kształtu SI maksymalna zawartość ziaren nieforemnych wg PN-EN 12620 wynosi 15% [14]. W zakładach produkcji kruszyw, w których stosowane jest wielostopniowe kruszenie w kruszarkach stożkowych lub udarowych, osiągnąć można kruszywo o zawartości ziaren nieforemnych poniżej 10% [1,2,7]. Kruszywa o kategorii wskaźnika kształtu SI_{20} lub wskaźnika płaskości FI_{20} w większości zastosowań uznać można za wystarczająco foremne.

Mrozoodporność kruszywa w aspekcie jego wykorzystania do betonu jest bardzo istotną cechą. Metoda oznaczenia mrozoodporności kruszyw ceramicznych oparta jest na PN-EN 1367-1 [15].

W wyniku przeprowadzenia szeregu badań w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie, oznaczono parametry

jakościowe kruszywa ceramicznego, które porównano z parametrami charakteryzującymi kruszywo naturalne (tab. 1). Kruszywo ceramiczne posiadało gorsze parametry jakościowymi niż kruszywo naturalne, co głównie wynikało z dużej zawartości ziaren płaskich.

Tabela 1. Cechy jakościowe kruszywa ceramicznego i naturalnego [5]

Table 1. Characteristics of the ceramic and natural aggregates [5]

Cecha kruszywa	Jednostka	Kruszywo sztuczne (ceramiczne)	Kruszywo naturalne (kamień wapienny)
Gęstość objętościowa	Mg/m ³	2,43	2,65
Nasiąkliwość	%	3,8	0,7
Zawartość ziarn płaskich	%	54	24
Odporność na rozdrabnianie (Los Angeles)	%	35	26
Mrozoodporność, ubytek masy po 10 cyklach	%	0,1–0,7	0,3

5. Parametry jakościowe betonu z kruszywem ceramicznym

Najwłaściwszą ocenę danego kruszywa uzyskuje się przeprowadzając badania betonu sporządzonego z udziałem ocenianego kruszywa. Należy bowiem pamiętać, że dobre kruszywo to takie, z którego można wykonać dobry (dla danych warunków) beton. Dlatego kruszywa uzyskane z odpadów ceramicznych użyto do sporządzenia mieszanki betonowej. Dla porównania cech jakościowych betonu sporządzono również beton z udziałem kruszywa wyprodukowanego z wapienia dewońskiego.

Założono, że w celu porównania cech jakościowych betonu z kruszywem sztucznym (ceramicznym) i kruszywem naturalnym, sporządzone zostaną mieszanki betonowe zawierające taką samą ilość cementu, taki sam punkt piaskowy i jednakowy stosunek wody do cementu (w/c).

Skład mieszanek betonowych podano w tabeli 2, a właściwości świeżych mieszanek betonowych w tabeli 3. Badania świeżych mieszanek jak i stwardniałego betonu prowadzono w oparciu o normy: PN-EN 206-1, PN-EN 12350-2 [10], PN-EN 12350-7 [11], PN-EN 12390-3 [12], PN-EN 12390-7 [13], PN-88/B-06250 [9].

Tabela 2. Składy mieszanek betonowych
Table 2. Compositions of the concrete mixtures

Skład mieszanki betonowej	Mieszanka betonowa z kruszywem ceramicznym		Mieszanka betonowa z kruszywem naturalnym	
	Udział frakcji kruszywa, %	Wagowy udział składników mieszanki, kg/m ³	Udział frakcji kruszywa, %	Wagowy udział składników mieszanki, kg/m ³
Kruszywo drobne 0/2	35	520	35 (piasek)	583
Kruszywo 2/4	23	342	23 (wapień)	383
Kruszywo 4/8	21	312	21(wapień)	358
Kruszywo 8/16	21	312	21(wapień)	358
Cement CEM I 42,5 R	–	380	–	380
Woda	–	255	–	259

Mieszanka betonowa z udziałem kruszywa sztucznego posiadała mniejszą gęstość, większą zawartość powietrza i charakteryzowała się mniejszym rozplywem. Mniejsza gęstość betonu z udziałem kruszywa sztucznego, jak i większa zawartość powietrza wskazuje na to, że jest to beton bardziej porowaty. Cecha ta ma ścisły związek z dużą zawartością ziaren płaskich występujących w kruszywie sztucznym.

Mniejszy opad stożka informuje o tym, że mieszanka betonowa jest mniej plastyczna i trudniej urabialna, co jest niekorzystną cechą. Trudna urabialność mieszanki betonowej zawierającej dużą ilość nieforemnych ziaren kruszywa ceramicznego spowodowana jest tym, że ziarna nieforemne posiadają większą powierzchnię właściwą niż ziarna foremne. Aby uzyskać mieszankę o dobrej urabialności wymagane jest użycie większej ilości zaczynu cementowego do pokrycia powierzchni ziaren kruszywa. Rozwiązanie takie jest jednak niekorzystne z uwagi na większy koszt mieszanki betonowej zawierającej większą ilość cementu. Dane z tabeli 2 i 3 wskazują, że beton sporządzony z udziałem kruszywa sztucznego będzie posiadał niższe parametry wytrzymałościowe.

Parametry wytrzymałościowe betonu, po 28 dniach oraz betonu poddanego zamrażaniu i rozmrażaniu przedstawiono w tabeli 4.

Beton z kruszywem sztucznym posiadał mniejszą wytrzymałość na ściskanie (ok. 33 MPa) niż beton z kruszywem naturalnym (ok. 49 MPa). Wytrzymałość na ściskanie wynosząca 33 MPa wskazuje, że możliwe jest uzyskanie betonów klasy C 16/20–C 20/25, a więc powszechnie stosowanych w budownictwie.

Tabela 3. Cechy świeżego betonu

Table 3. The fresh concrete properties

Cecha betonu	Mieszanka betonowa z kruszywem sztucznym (ceramicznym)	Mieszanka betonowa z kruszywem naturalnym (wapienie związane)
Stosunek w/c	0,67	0,68
Opad stożka, cm	4,5	6,0
Gęstość świeżego betonu, kg/dm ³	2,03	2,33
Zawartość powietrza,%	5,2	2,7

Spadek wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywem sztucznym poddanego cykлом zamrażania i rozmrażania wyniósł 18,3%, a więc był stosunkowo wysoki. Ogranicza to możliwości jego stosowania jedynie do budowli zamkniętych, bez oddziaływania temperatur ujemnych. Korzystny jest natomiast zerowy ubytek masy betonu z kruszywem ceramicznym, poddanego badaniu mrozoodporności.

Badania wytrzymałości betonu na ściskanie prowadzono na kostkach sześciennych o wymiarach 150x150x150 mm. W tabeli 4 podano średnie wartości z badania 3 kostek betonu. Odchylenia poszczególnych wyników od wartości średniej nie przekraczały 3%.

Analizując parametry wytrzymałościowe betonu, po 28 dniach oraz betonu poddanego zamrażaniu i rozmrażaniu warto także zwrócić uwagę na przyrost wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywem ceramicznym, oznaczonej po czasie dłuższym niż 28 dni.

Głównymi niekorzystnymi cechami kruszywa ceramicznego, które mają niekorzystny wpływ na jakość betonu, jest jego duża nasiąkliwość i duża zawartość ziaren nieforemnych. Oddziaływanie tych niekorzystnych cech kruszywa sztucznego można ograniczyć poprzez zastosowanie dodatków hydrofobowych, które zmniejszają nasiąkliwość, a tym samym zwiększają wodoszczelność betonu. Niekorzystny kształt ziaren można poprawić stosując do rozdrabniania odpadów ceramicznych

kruszarcki charakteryzujące się dobrą kubicznością produktów pokruszonych np. kruszarcki udarowe oraz stosując kruszenie w kilku stadiach i kruszenie w obiegu zamkniętym [1, 2, 6, 7].

Tabela 4. Parametry jakościowe betonów

Table 4. Qualitative characteristics of concretes

Parametry wytrzymałościowe	Jednostka	Beton z kruszywem sztucznym	Beton z kruszywem naturalnym
Wytrzymałość na ściskanie R_{C1}	MPa	33,0	43,8
Nasiąkliwość	%	11,0	7,4
Mrozoodporność – ubytek masy po zamrażaniu	%	0,01	0,26
Wytrzymałość na ściskanie prób zamrażanych R_{C2}	MPa	33,1	49,3
Wytrzymałość na ściskanie prób porównawczych R_{C3}	MPa	40,5	49,3
Mrozoodporność – spadek wytrzymałości na ściskanie	% ($R_{C3} - R_{C2}$) / R_{C3}	18,3	0

Oceniając właściwości badanego betonu warto zaznaczyć, że został on sporządzony wyłącznie z udziałem kruszywa z odpadów ceramicznych. W sytuacji, kiedy kruszywa ceramiczne stanowią część całej ilości kruszywa, spodziewać się można znacznie lepszych parametrów jakościowych betonu.

6. Podsumowanie

Odpady budowlane są bardzo ważnym lokalnym źródłem znacznej ilości kruszyw z recyklingu nadających się do zagospodarowania po wcześniejszym ich przetworzeniu, zbadaniu i zakwalifikowaniu do odpowiednich celów. Ponowne użycie raz wbudowanych materiałów w budownictwie, a szczególnie w budownictwie drogowym, jest technicznie możliwe i daje określone efekty gospodarcze.

Rezerwy surowców naturalnych w niektórych regionach naszego kraju szybko się pomniejszają, a ich eksploatacja i transport na znaczne odległości staje się mniej opłacalna. Dlatego przy coraz częstszym powstawaniu różnego rodzaju odpadów i braku ich dalszych fizycznych

możliwości składowania, utworzenie praktycznych możliwości wprowadzenia do budownictwa kruszywa z powstających odpadów budowlanych jest działaniem celowym i pożytecznym. Jest to także szansa dla rozwoju firm, które mogłyby w sposób przemysłowy przerabiać odpady porozbiórkowe z istniejących hałd, z bieżących remontów i wyburzeń obiektów budowlanych i in. Selektywna gospodarka odpadów oparta na wyodrębnieniu odpadów z ceramiki budowlanej może być cennym źródłem surowców wtórnych do produkcji kruszyw znajdujących zastosowanie w produkcji betonów i drogownictwie.

W ocenie jakości kruszyw uzyskanych z odpadów ceramicznych najbardziej widoczny był ich niekorzystny kształt ziaren. Instalacje produkcji kruszyw mineralnych z odpadów powinny być więc oparte na wielostadialnych układach rozdrabniania i klasyfikacji w obiegach zamkniętych oraz na uszlachetnianiu kruszyw. Do rozdrabniania odpadów ceramicznych wskazane jest stosowanie kruszarek charakteryzujących się dobrą kubecznością produktów pokruszonych np. kruszarek udarowych. Takie metody przeróbcze pozwolą na uzyskiwanie kruszyw o niskiej zawartości ziaren płaskich i zanieczyszczeń.

Oprócz dużej zawartości ziaren nieforemnych, cechą kruszywa ceramicznego mającą niekorzystny wpływ na jakość betonu, jest jego duża nasiąkliwość. Niekorzystne cechy reologiczne mieszanek betonowej, będące wynikiem oddziaływania niekorzystnych cech kruszywa, można poprawić poprzez zastosowanie dodatków hydrofobowych, które zmniejszają nasiąkliwość, a tym samym zwiększają wodoszczelność betonu.

Przeprowadzone badania betonu są niepełne i będą kontynuowane w celu uzyskania dokładniejszej oceny możliwości zastosowania kruszyw z odpadów ceramicznych do wytworzenia betonu. Wstępne wyniki badań wskazują, że odpady ceramiczne, po uprzednim przetworzeniu, mogą być stosowane w budownictwie. Przy dokładnym zbadaniu właściwości kruszyw sztucznych i zastosowaniu odpowiednich dodatków korygujących, alternatywą dla gromadzonych kruszyw jest wykorzystywanie ich do produkcji betonów, szczególnie w warunkach, w których nie występuje oddziaływanie temperatur ujemnych.

*Artykuł jest wynikiem realizacji projektu badawczego
MNiSW nr N N524 466139*

Literatura

1. **Gawenda T.:** *Problematyka doboru maszyn kruszących w instalacjach produkcji kruszyw mineralnych*, Górnictwo i Geoinżynieria, Polski Kongres Górniczy 2010, IX krajowy zjazd górnictwa odkrywkowego. 34 z. 4 s. 195–209. Kraków 2010.
2. **Gawenda T.:** *Wpływ rozdrabniania surowców skalnych w różnych kruszarkach i stadiach kruszenia na jakość kruszyw mineralnych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi Polska Akademia Nauk. Komitet Gospodarki Surowcami Mineralnymi; Kraków 2013 (przyjęty do druku).
3. **Gawenda T., Olejnik T.:** *Produkcja kruszyw mineralnych z odpadów powęglowych w Kompanii Węglowej S. A. na przykładzie wybranych kopalń*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi PAN. Komitet Gospodarki Surowcami Mineralnymi; t. 24 z. 2/1 s. 27–42, Kraków 2008.
4. **Gawenda T., Saramak D., Tumidajski T.:** *Modele regresyjne rozdrabniania surowców skalnych w kruszarce szczękowej*, ZN Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej, nr 22, seria Inżynieria Środowiska, s 659–670, Koszalin 2005.
5. **Gawenda T., Walerak A.:** *Kruszywa z odpadów ceramicznych*. Surowce i Maszyny Budowlane. Wyd. BMP nr 4 55–59 Racibórz 2012.
6. **Naziemiec Z., Gawenda T.:** *Badanie procesu kruszenia z zamkniętym obiegiem*. *Kruszywa mineralne: surowce – rynek – technologie – jakość*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej; nr 119. 107–116, Wrocław-Szklarska Poręba, 2007.
7. **Naziemiec Z., Gawenda T.:** *Ocena efektów rozdrabniania surowców mineralnych w różnych urządzeniach kruszących*. VI Konferencja „Kruszywa Mineralne – surowce – rynek – technologie – jakość”, s 83–94. OWPW Wrocław-Szklarska Poręba, 2006.
8. **Neville A. M.:** *Właściwości betonu*. Wyd. Polski Cement. Kraków 2000.
9. PN-88/B-06250 Beton zwykły.
10. PN-EN 12350-2 Badanie mieszanki betonowej. Część 2. Badanie konsystencji mieszanki betonowej.
11. PN-EN 12350-7 Badanie mieszanki betonowej. Część 7. Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
12. PN-EN 12390-3 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
13. PN-EN 12390-7:2011 Badania betonu. Część 7. Gęstość betonu.
14. PN-EN 12620 Kruszywa do betonu.
15. PN-EN 1367-1 Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych. Część 1. Oznaczanie mrozoodporności.

16. PN-EN 933-3 Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości.
17. **Saramak D., Tumidajski T., Gawenda T., Naziemiec Z., Brozek M.:** *Aspects of comminution flowsheets design in processing of mineral raw materials*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral Resources Management. Vol. 26, Issue: 4, 59–69 (2010).
18. **Tumidajski T., Gawenda T., Niedoba T., Saramak D.:** *Kierunki zmian technologii przeróbki węgla kamiennego w Polsce. Scenariusze rozwoju technologicznego przemysłu wydobywczego węgla kamiennego*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Polska Akademia Nauk. Komitet Gospodarki Surowcami Mineralnymi; t. 24 z. ½, s. 245–258 (2008).
19. **Walerak A.:** *Analiza układu technologicznego procesu produkcji wyrobów ceramicznych oraz utylizacji powstających odpadów na przykładzie firmy Opoczno S.A.* Praca magisterska, Biblioteka AGH w Krakowie 2012.
20. www.ietu.katowice.pl [dostęp: kwiecień 2012].
21. www.malopolskie.pl [dostęp: kwiecień 2012].
22. PN-EN 206-1. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

Investigations on Selected Properties of Aggregates from Ceramic Waste and Concrete Produced with Their Participation

Abstract

The aim of the paper was to present the possibilities of ceramic waste utilization towards the artificial aggregaters and concretes production. The investigations covered the waste comminution experiments at AGH in two-stage circuits with jaw and roll crushers, and particle size analyses. Experiments in ICMB Institute in Cracow included a determination of the water absorption index, comminution resistance and frost-resistance coefficients, as well as the bulk density. Two types of concretes were compared, the one produced with the participation of ceramic waste, and the other, produced from Devonian limestone.

The aggregates produced from ceramic waste had an unfavorable particle shape. Jaw crushers on the first and second stage produced 63 and 22% of irregular particles respectively, while the roll crusher on second stage only 14%. The plant production aggregates from the waste should therefore be based on a closed multi-stage crushing and classification circuits with processing of aggregates. Ceramic waste crushing should be performed in devices producing

cubical products, like impactors. These methods allow to obtain the aggregates with the smallest flatness indices and without pollution.

The high water absorption, lower comminution and frost resistance of concretes are further unfavorable properties of aggregates produced from the ceramic waste. Unfavorable rheological properties of the concrete mixtures, resulting from the impact of the aggregate disadvantages can be improved by the use of hydrophobic additives which reduce the water absorption, thereby increasing water resistance of concrete.

Artificial aggregate concrete had a lower compressive strength (about 33 MPa) than the natural concrete (about 49 MPa). Decrease in compressive strength of the artificial aggregate concrete subjected to freezing and defrosting cycles was 18.3%, which is a relatively high and negative.

Summing up, the ceramic waste after a prior processing can be applied in the building industry. After a precise examination of the properties of artificial aggregates and application of suitable additives, they can be alternatively used in concrete production, particularly under conditions in which there is no impact of temperatures below zero degrees.