

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 34**  
(lipiec–wrzesień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

**Rok XI**

**Warszawa–Opole 2018**

---

MAREK GAWLICKI\*  
GRZEGORZ SIEMIĄTKOWSKI\*\*

# Produkty przetwarzania odpadów betonowych

**Słowa kluczowe:** odpady budowlane, beton z recyklingu, kruszywo, namiar surowcowy, spiekalność.

Przetwarzanie zużytych betonów stanowi ważny element gospodarki o obiegu zamkniętym. Podstawowym kierunkiem przeróbki betonowego gruzu budowlanego i rozbiórkowego oraz odpadów produkcyjnych, powstających w wytwórniach prefabrykatów budowlanych, jest pozyskiwanie kruszyw, które mogą być wykorzystane powtórnie jako składnik mieszanek betonowych. Jakość otrzymywanych kruszyw uzależniona jest głównie od rodzaju kruszyw w przetwarzanym betonie i zawartości w nich pozostałości „starego” zaczynu cementowego. W pracy omówiono mikrostrukturę i skład fazowy zaczynu cementowego oraz ich wpływ na podstawowe cechy użytkowe kruszyw uzyskiwanych z przeróbki betonów. Przedstawiono również możliwości wykorzystania droбноziarnistego materiału powstającego podczas rozdrabniania betonów jako składnika namiaru surowcowego do wytwarzania klinkieru portlandzkiego.

## 1. Wprowadzenie

Beton jest uniwersalnym materiałem budowlanym, powszechnie stosowanym przy wznoszeniu wszelkiego rodzaju budowli, w tym także spektakularnych dzieł inżynierskich takich np. jak zapora Hoovera na rzece Kolorado w USA, czy też Burj Khalifa w Dubaju. Beton jest kompozytem wytwarzanym z trzech głównych składników: cementu, kruszywa i wody. Może zawierać również dodatki mineralne i domieszki oraz zbrojenie ciągłe lub rozproszone. Woda i kruszywo, a w określonych przypadkach jego część, są używane do produkcji betonu w stanie naturalnym. Pozostałe składniki betonu są produktami przemysłowymi lub stanowią odpady przemysłowe (popioły lotne, pyły krzemionkowe, żużel

---

\* Dr hab. inż., prof. ICiMB, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu, m.gawlicki@icimb.pl

\*\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu, g.siemiotkowski@icimb.pl

hutniczy). Z odpadów przemysłowych mogą być wytwarzane również kruszywa lekkie.

Roczną produkcję betonu w skali światowej szacuje się obecnie na ponad 30 mld Mg, czyli ok. 15 mld m<sup>3</sup>, co oznacza, że na każdego mieszkańca globu przypada rocznie ponad 2 m<sup>3</sup> tego materiału. Jest to bardzo dużo, gdyż roczna światowa produkcja betonu *per capita* przekracza ponad dwa razy ilość płynów (wody), jaką powinien spożyć w tym samym okresie każdy człowiek i jest dwukrotnie większa niż produkcja wszystkich pozostałych materiałów budowlanych razem wziętych (drewno, stal, tworzywa sztuczne, szkło i aluminium).

Duże możliwości zastosowania i modyfikowania cech użytkowych betonu sprawiają, że jest on jedynym materiałem mogącym sprostać narastającym potrzebom budownictwa w coraz bardziej zurbanizowanym świecie, w którym bardzo szybko rośnie zapotrzebowanie na relatywnie tanie, uniwersalne materiały budowlane.

Konstrukcje betonowe mogą spełniać swe funkcje w sposób zadowalający przez długi, ale jednak ograniczony czas, po którym należy je zdemontować (zburzyć) lub poddać renowacji. W obu przypadkach powstają znaczne ilości gruzu. Do odpadów z wyburzeń i rozbiórki zaliczane są również odpady budowlane powstające w trakcie wznoszenia nowych budowli, wykonywania remontów oraz odpady produkcyjne z zakładów wytwarzających prefabrykaty betonowe. Całkowita masa tego rodzaju odpadów powstających w Europie szacowana jest na ok. 200 mln Mg rocznie [1].

Odpady budowlane, zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, a tym samym zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym, powinny zostać w całości zagospodarowane, co wymaga między innymi szeregu rozwiązań organizacyjnych oraz dużych nakładów finansowych. Oczywiście jest zatem, że podejmowane działania powinny być motywowane nie tylko potrzebą szeroko rozumianej ochrony środowiska naturalnego, ale również winny być w sposób nadrzędny uwarunkowane przesłankami ekonomicznymi.

Skład odpadów budowlanych i rozbiórkowych jest zróżnicowany i uzależniony od wielu czynników, w tym również od sposobów prowadzenia i organizacji prac demontażowych. W Europie odpady z rozbiórki budynków składają się głównie z gruzu betonowego, którego udział w całkowitej masie odpadów budowlanych systematycznie rośnie, oraz gruzu ceglanego. W niektórych jednak regionach omawiane odpady zawierają również znaczne ilości drewna. Racjonalna gospodarka odpadami wymaga ich starannego sortowania, które powinno być zaplanowane, zapoczątkowane i konsekwentnie prowadzone już podczas rozbiórki konstrukcji budowlanych. Kolejnym, ważnym etapem działań jest zgromadzenie poszczególnych rodzajów odpadów na oddzielnych składowiskach i zabezpieczenie ich przed powtórny mieszaniem (zanieczyszczeniem).

Betonowe odpady budowlane mogą być zagospodarowane (poza ich deponowaniem i wykorzystaniem do niwelacji terenu) w dwojaki sposób:

- wydzielenie ze strumienia odpadów elementów betonowych, które mogą być w stanie pierwotnym powtórnie wykorzystane w konstrukcjach budowlanych i rozdrobnienie pozostałej części materiału w celu jego dalszej przeróbki;
- rozdrobnienie całej masy dostarczonych odpadów betonowych prowadzące do uzyskania kruszywa, które po rozdzieleniu na odpowiednie frakcje ziarnowe wykorzystane zostanie jako składnik mieszanek betonowych.

W obydwu wymienionych wyżej przypadkach należy skutecznie dążyć do zapewnienia dostatecznie wysokiej jakości otrzymywanego kruszywa, powtórnie wykorzystywanego do wytwarzania betonów. Bardzo ważne jest także wskazanie racjonalnego sposobu zagospodarowania nieprzydatnych w produkcji betonów bardzo drobnych frakcji ziarnowych (pyłów lub szlamów), powstających w wyniku rozdrabniania odpadów.

Powtórne użycie w pierwotnej formie całych elementów betonowych, uzyskiwanych w wyniku rozbiórki konstrukcji budowlanych jest stosunkowo rzadkie i ogranicza się najczęściej do betonowych płyt zbrojonych, przeznaczonych do tworzenia nawierzchni drogowych lub do pokrywania powierzchni składowisk i parkingów. Demontaż jedenastopiętrowych bloków mieszkalnych („wielka płyta”) na terenie byłej NRD dostarczył jednak przykładów, że można z pozyskanych tą drogą płyt podłogowych, stropowych i ściennych wybudować bardziej przyjazne środowisku naturalnemu domy mieszkalne oraz funkcjonalne garaże.

Ajdukiewicz i Kliszczewicz w swym obszernym referacie wymieniają następujące kierunki zagospodarowania gruzu betonowego [2]:

- jako substytut kruszywa do betonów,
- na nasypy lub podbudowy drogowe,
- do wzmocnienia gruntu,
- do warstw drenujących i wyrównawczych,
- do rekultywacji składowisk i zapełniania wyrobisk.

Wybór sposobu wykorzystania gruzu betonowego uzależniony jest od wielu czynników o zróżnicowanej wadze decyzyjnej, jednak w ostatecznym rozrachunku najważniejszą rolę odgrywają zazwyczaj ekonomiczne uwarunkowania przedsięwzięcia. Analizując aktualne trendy, można z dużą dozą prawdopodobieństwa przewidzieć postępujący wzrost cen kruszyw naturalnych, zwiększenie opłat za składowanie odpadów oraz wzrost kosztów transportu. Czynniki te, wraz z narastającą „proekologiczną świadomością” społeczeństw, sprzyjać będą działaniom prowadzącym do jak największej substytucji kruszyw naturalnych przez kruszy-

wa z recyklingu, a zatem pierwszemu z wymienionych wyżej [2] kierunkowi wykorzystania gruzu betonowego.

Autorzy prac poświęconych przeróbce gruzu betonowego koncentrują się niemal wyłącznie na opisie sposobów jego pozyskiwania oraz problemach mechanicznej przeróbki materiału, głównie na rozdrabnianiu, wydzielaniu z gruzu części metalowych (zbrojenie) oraz rozdzielaniu materiału na określone frakcje ziarnowe (przesiewanie) i usuwaniu z kruszywa zaprawy cementowej [3–5]. Według „normy betonowej” PN-EN 206+A1:2016 [6] ogólną przydatność kruszywa, zarówno naturalnego, łamanego, sztucznego czy recyklingowego; ustala się w oparciu o wymagania „norm kruszynowych”, tj. PN-EN 12620+A1:2010 [7] (kruszywa zwykłe i ciężkie) i PN-EN 13055:2016 [8] (kruszywa lekkie). Na podstawie najważniejszych właściwości kruszyw, m.in. takich jak wytrzymałość, nasiąkliwość czy mrozoodporność oraz przeznaczenia betonu, można określić przydatność i ilość kruszywa (w tym recyklingowego) jaką można bezpiecznie wprowadzić do betonu.

Celem artykułu jest opis właściwości stwardniałej zaprawy cementowej obecnej w rozdrobnionym gruzie betonowym, który po odpowiedniej przeróbce będzie mógł zostać użyty jako kruszywo w betonie (frakcje ziarnowe zawarte w przedziale 2–16 mm), zaś pozostała jego część o uziarnieniu  $< 2$  mm wykorzystana zostanie jako składnik zamiaru surowcowego do produkcji klinkieru portlandzkiego, przetworzonego następnie na cementy powszechnego użytku [9].

O ile pierwszy rodzaj zastosowania materiałów pozyskiwanych z gruzu betonowego – kruszywa z recyklingu, jest realizowany w wielu krajach (Belgia, Holandia, Dania) na szeroką skalę [1], o tyle informacje o wykorzystaniu frakcji pylistych dotyczą jedynie badań laboratoryjnych [10].

## 2. Kruszywo z przeróbki gruzu betonowego

Właściwości użytkowe betonowego kruszywa z recyklingu (BKR) są uzależnione od rodzaju oraz cech kruszyw stanowiących składnik rozdrabnianych betonów i są tym bardziej zróżnicowane, im większa jest liczba źródeł, z których pochodzą przetwarzane betony. Większość właściwości BKR, a tym samym cech użytkowych betonów wytwarzanych z ich udziałem, jest determinowana jednak zawartością w nich „starej” zaprawy cementowej, która może być zespolona z ziarnami kruszywa lub tworzyć oddzielne ziarna, a także przekształcić się w wyniku mechanicznej przeróbki gruzu betonowego we frakcję pylistą. Zawartość zaprawy w kruszywie z recyklingu jest w znacznej mierze uzależniona od sposobu pozyskiwania BKR i może stanowić nawet 60% jego całkowitej objętości [3]. Obecność zaprawy w BKR obniża gęstość kruszywa i znacznie pogarsza jego właściwości użytkowe, powodując między innymi znaczący wzrost porowatości oraz zwiększenie wodożądności, co skutkuje między innymi obniżeniem jego

wytrzymałości i trwałości. Konsekwencją zmian właściwości kruszyw są zmiany cech użytkowych betonów wytwarzanych z ich udziałem – obniżenie wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i zginanie, zmniejszenie modułu sprężystości oraz wzrost skurczu i pęcznienia betonu, a także ograniczenie jego odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie [11–14]. Gęstość objętościowa BKR może być o 10–15% niższa w porównaniu z gęstością objętościową betonów zawierających kruszywa pierwotna, BKR mogą wykazywać 3–7 razy większą absorpcję wody niż kruszywa naturalne [15]. Jakość betonów z udziałem BRK obniżają również zanieczyszczenia zawarte w kruszywie, między innymi takie jak drewno, gips, asfalt, szkło i tworzywa sztuczne.

Chcąc wyjaśnić przyczyny negatywnej roli starej zaprawy cementowej w kształtowaniu cech użytkowych betonów z udziałem BRK i konieczność eliminacji, lub jak największego ograniczenia jej zawartości w kruszywie, należy skoncentrować się na krytycznej analizie budowy zaprawy, a ściślej mikrostruktury zaczynu cementowego, który wraz z drobnym kruszywem (piaskiem) tworzy tę zaprawę. Dokonując takiej analizy należy pamiętać, że zaczyny cementowe są układami dynamicznymi, w których w sposób ciągły, acz z coraz mniejszą szybkością, zachodzą synergicznie przebiegające reakcje chemiczne i różnorakie procesy fizyczne zmieniające analizowane układy.

Wzajemny kontakt składników mieszanki betonowej inicjuje szereg przemian oraz reakcje chemiczne składników cementu z wodą, prowadzące do utworzenia betonu – zwartego, wielofazowego kompozytu o narastającej wytrzymałości, w którym ziarna kruszywa są zespolone produktami hydratacji składników cementu. W procesie wiązania oraz w początkowych okresach twardnienia główną rolę odgrywają fazy tworzące klinkier portlandzki, zaś w późniejszych okresach, zaznaczają swą aktywność hydrauliczną również inne materiały, które mogą być składnikami cementów powszechnego użytku: granulowany żużel wielkopiecowy, popioły lotne, pucolany oraz zmielony wapień. Istotną rolę odgrywa również gips znajdujący się w cemencie. Postępującemu wraz z upływem czasu przekształcaniu się mieszanki betonowej w beton towarzyszą zmiany składu fazowego i mikrostruktury zaczynu cementowego. Stwardniały zaczyn cementowy w „młodym betonie”, który może zostać dostarczony do zakładu wytwarzającego BRK jako odpad produkcyjny, pomijając inne składniki cementu niż klinkier portlandzki i gips, tworzą quasiamorficzne uwodnione krzemiany wapnia (C-S-H), wodorotlenek wapnia, fazy  $AF_t$  oraz uwodnione gliniany wapnia  $C_2AH_8$  i  $C_4AH_{13}$ . W zaczynie są obecne również relikty ziaren cementu, składające się głównie z belitu  $\beta-C_2S$ . Wraz z upływem czasu (wieku zapraw i betonów) zwiększa się w zaczynie cementowym zawartość C-S-H i zawartość wodorotlenku wapnia, głównie za sprawą hydratacji  $\beta-C_2S$ , fazy  $AF_t$  przekształcają się w  $AF_m$ , maleje liczba i wielkość reliktyw ziaren cementu, wzrasta stopień karbonatyzacji produktów hydratacji. Szybkość procesów zachodzących w zaczynie cemento-

wym w sposób ciągły maleje, zbliżając się aproksymatycznie do zera. Znaczący wpływ na budowę zaczynu cementowego wywiera wskaźnik wodno-cementowy (w/c). Pewną rolę w zmianach składu chemicznego i kształtowaniu właściwości zaczynu, zwłaszcza w przypowierzchniowych warstwach betonu, odgrywa jego kontakt z otoczeniem (roztwory wodne, CO<sub>2</sub> i inne kwaśne tlenki), a w szczególnych przypadkach również jego reakcje z aktywnymi składnikami kruszywa.

Stwardniały zaczyn cementowy zbudowany z przemieszanych ze sobą produktów hydratacji składników cementu o różnym stopniu wykształcenia struktury jest tworem porowatym, w którym w zależności od wielkości można wyróżnić:

- pory powietrzne (> 0,1 mm), relatywnie duże pustki powietrzne, powstałe w wyniku niedoskonałości zagęszczenia zaczynu;
- pory kapilarne (0,03 μm–0,1 mm) utworzone w wyniku obecności w zaczynie cementowym nadmiaru wody w stosunku ilości wody „stechiometrycznej”, niezbędnej do przeprowadzenia wszystkich reakcji chemicznych w zaczynie;
- pory żelowe – mikropory (< 0,03 μm) stanowiące integralną część składową mikrostruktury uwodnionych krzemianów wapnia (C-S-H).

O właściwościach mechanicznych stwardniałego zaczynu cementowego decyduje głównie zawartość, wielkość i rozmieszczenie w nim porów powietrznych i kapilarnych. Pory te, w zależności od warunków otoczenia i wieku betonu, są w mniejszym lub większym stopniu wypełnione cieczą porową, którą stanowi silnie alkaliczny (pH > 12,8) roztwór wodny o dużej zawartości jonów wapnia, potasu i sodu. Przykład składu stwardniałego zaczynu cementu portlandzkiego bez jakichkolwiek dodatków (klinkier portlandzki + gips) przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

*Udział objętościowy podstawowych składników tworzących zaczyn cementowy. Czas pielęgnacji zaczynu – 1 rok, w/s = 0,5 (w oparciu o [16])*

Składnik zaczynu	Udział objętościowy [% v/v]	
C-S-H	37	45
Ca(OH) <sub>2</sub>	11	13
AF <sub>m</sub>	15	18
CaCO <sub>3</sub>	1	1
Relikty faz klinkierowych	5	6
Mikropory	13	16
Pory kapilarne	18	–

Stwardniały zaczyn cementowy stanowi niejednorodny, najslabszy pod względem wytrzymałości mechanicznej składnik zaprawy, a tym samym betonu. Jego warstwy kontaktowe z kruszywem znacznie różnią się od „wewnętrznych” obszarów zaczynu. Są nie tylko wzbogacone w Ca(OH)<sub>2</sub> i fazy siarczanowe, ale są również

bardziej porowate. Należy je traktować jako „obszary krytyczne”, determinujące wiele cech betonu. Jest to szczególnie ważne w przypadku betonów z kruszywem z recyklingu, zawierających pewną ilość „starej” zaprawy. W betonach tych zaznaczają swą obecność strefy kontaktowe o odmiennym mikrostrukturze i trwałości; między powierzchniami ziaren poszczególnych składników kruszywa i zaprawą (nowe strefy kontaktowe) oraz między kruszywem i starą zaprawą (stare strefy kontaktowe). W BKR mogą występować również pęknięcia i rysy powstałe podczas kruszenia betonu. Zwiększenie liczby i objętości stref kontaktowych, które są *de facto* makrodefektami, powoduje znaczne pogorszenie cech użytkowych betonów i w sposób oczywisty wskazuje działania prowadzące do poprawy jakości kruszyw z recyklingu – usunięcie z BKR w jak największym stopniu starej zaprawy cementowej. Kolejnym problemem wynikającym z obecności w BKR starej zaprawy cementowej jest jej duża wodożądność, powodująca „podbieranie” wody ze świeżego zaczynu cementowego, co pogarsza urabialność i może utrudnić uzyskanie założonej konsystencji mieszanki betonowej [17–18].

### **3. Odpad z przeróbki gruzu betonowego jako składnik namiaru surowcowego do produkcji klinkieru portlandzkiego**

Działania mające na celu uzyskania dobrej jakości kruszyw w wyniku przeróbki gruzu betonowego obejmują szereg operacji technologicznych, na które składają się głównie rozdrabnianie, przemieszczanie i przesiewanie dużych partii materiałów ziarnistych o zróżnicowanej odporności poszczególnych składników gruzu na działanie wszelkiego rodzaju sił. Najmniej odporne są ziarna lub fragmenty ziaren zbudowane z zaprawy cementowej. W efekcie przeróbki gruzu betonowego, poza kruszywem przeznaczonym do powtórnego wykorzystania, powstaje drobnoziarnisty odpad składający się z produktów hydratacji cementów oraz piasku kwarcowego, który może być deponowany lub stanowić np. podsypkę pod kostkę brukową. Podstawowymi tlenkami tworzącymi wspomniany odpad są:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a zatem tlenki stanowiące 95–98% masy klinkieru portlandzkiego. Sugeruje to przydatność omawianego odpadu w produkcji cementów powszechnego użytku.

Działania podejmowane w cementowniach w celu zagospodarowania różnego typu odpadów są w decydującym stopniu uwarunkowane przesłankami ekonomicznymi, podstawę których stanowi najczęściej dążenie do zmniejszenia jednostkowej emisji  $\text{CO}_2$  do atmosfery. W określonej instalacji przemysłowej można osiągnąć to poprzez:

- ograniczenie w namiarze surowcowym zawartości węgla wapnia,
- poprawę spiekalności namiaru surowcowego.



Podstawowymi składnikami zamiaru surowcowego są w większości cementowni zmielone wapnienie i margle zmieszane ze sobą w ilościach zapewniających ok. 75% udział  $\text{CaCO}_3$  w masie materiału wprowadzanego do instalacji piecowej. Zgodnie ze stechiometrią reakcji dekarbonatyzacji węglanu wapnia ( $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ), tlenek wapnia stanowi 56%, zaś dwutlenek węgla 44% masy produktów.

Drobnoziarnisty (pylisty) odpad powstały podczas rozdrabniania gruzu budowlanego może zawierać nawet ok. 40% tlenku wapnia, przy stratach prażeń wynoszących ok. 32% [10]. Zawartość  $\text{CO}_2$  w omawianym materiale jest niewielka i nie przekracza 2–3%, co powoduje, że z punktu widzenia emisji dwutlenku węgla analizowany odpad jest pożądanym surowcem do wytwarzania klinkieru portlandzkiego. Mankamentem odpadu może okazać się zawartość w nim nadmiernych ilości grubokrystalicznego  $\text{SiO}_2$ , który trudno wchodzi w reakcje z pozostałymi składnikami zamiaru surowcowego [19]. Kierując zatem drobnoziarnisty odpad z przeróbki gruzu budowlanego do cementowni, należy zadbać o usunięcie z niego jak największej ilości piasku kwarcowego, który może być zagospodarowany w inny sposób, np. jako drobne kruszywo kwarcowe w zaprawach budowlanych.

Badania zamiarów surowcowych, do których wprowadzono drobnoziarnisty odpad z przeróbki gruzu budowlanego o relatywnie małej zawartości  $\text{SiO}_2$  (ok. 33% mas. w wyprażonym materiale) wykazały bardzo dobrą spiekalność tych zamiarów [10, 20], potwierdzając przydatność omawianego odpadu jako surowca do wytwarzania klinkieru portlandzkiego. Oceny spiekalności dokonano w oparciu o oznaczenia w badanym materiale zawartości niezwiązanego CaO w temperaturze 1350, 1400, 1450 i 1500°C, obliczając wskaźnik spiekalności BI (*burnability index*) w sposób opisany w pracy [21].

## 4. Podsumowanie

Przeróbkę betonowego gruzu budowlanego i rozbiórkowego oraz produkcyjnych odpadów betonowych powstających w wytwórniach prefabrykatów budowlanych należy prowadzić w sposób umożliwiający ich całkowite zagospodarowanie. Dokonać tego można, produkując kruszywo przeznaczone do wytwarzania betonów i wykorzystując powstające podczas przeróbki gruzu frakcje drobnoziarniste jako składnik zamiaru surowcowego do wytwarzania klinkieru portlandzkiego. Podstawowym zagrożeniem dla jakości kruszyw z recyklingu jest obecność w nich pozostałości „starej” zaprawy cementowej. Wprowadzenie do zamiaru surowcowego pyłu z rozdrobnionego betonu umożliwia zmniejszenie jednostkowej emisji  $\text{CO}_2$  i ułatwia proces spiekania, pod warunkiem jednak ograniczenia w materiale zawartości piasku kwarcowego\*.

\* Praca została wykonana w ramach realizacji tematu 4N001R17.

## Literatura

- [1] *Beton w zrównoważonym budownictwie mieszkaniowym*, red. Z. Pilch, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2018.
- [2] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., *Problemy stosowania recyklingu w budownictwie betonowym*, [w:] *Zrównoważony rozwój w budownictwie*, red. A. Łapko, M. Brodniewicz, J.A. Prusiel, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2008, s. 337–356.
- [3] *Handbook of recycled concrete and demolition waste*, ed. F. Pacheco-Torgal a.a., Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2013.
- [4] Huang W.-L., Lin D.-H., Chang N.-B., Lin K.-S., *Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process*, „Resources, Conservation and Recycling” 2002, Vol. 37, No. 1, s. 23–37.
- [5] Tam U.V.M., Tam C.M., *Re-use of construction and demolition waste in housing developments*, Nova Science Publishers, New York 2008.
- [6] PN-EN 206+A1:2016 – Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [7] PN-EN 12620+A1:2010 – Kruszywa do betonu.
- [8] PN-EN 13055:2016-07 – Kruszywa lekkie. Cz. 1: *Kruszywa lekkie do betonu, zaprawy i rzadkiej zaprawy*.
- [9] PN-EN 197-1:2012 – Cement. Cz. 1: *Skład wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*
- [10] Marroconi M., Telesca A., Ibris N., Maik T.R., *Construction and demolition wastes as raw materials for sustainable cements*, [w:] *Fourth International Conference on Sustainable Materials and Technologies, SCMT 4, Las Vegas, August 7–11, 2016*, ed. P. Claisse, E. Ganjian, T.Naiki, Coventry University, Coventry 2016.
- [11] European Union. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives, 2008. Doi: 2008/98/EC. 32008L0098.
- [12] Thomas C., Setién J., Polanco J.A., Alaejos P., de Juan M.S., *Durability of recycled aggregate concrete*, „Construction Building Materials” 2013, Vol. 40, s. 1054–1065.
- [13] Thomas C., Setién J., Polanco J.A., *Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes*, „Construction Building Materials” 2016, Vol. 114, s. 536–546.
- [14] Medina C., Sánchez de Rojas M.I., Thomas C., Polanco J.A., Frías M., *Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Interindicator relationships*, „Construction Building Materials” 2016, Vol. 105, s. 480–486.
- [15] Richardson A., Coventry K., Bacon J., *Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete*, „Journal of Cleaner Production” 2011, Vol. 19, No. 2/3, s. 272–277.
- [16] *Advances in Cement Technology*, ed. S.N. Ghosh, Pergamon Press, B.m. 1983.
- [17] Pawluczuk E., *Kształtowanie strefy kontaktowej kruszywo–zaczyn w betonach recyklingowych*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska” 2011, nr 2, s. 369–376.
- [18] Jevtić D., Zakić D., Savić A., *Achieving sustainability of concrete by recycling of solid waste materials*, „Mechanical Testing and Diagnosis” 2012, Vol. 1, No. 2, s. 22–39.
- [19] Garbacik A., Pałka E., Szelağ H., *Zdolność do klinkieryzacji mieszanin surowcowych z dużym udziałem piasku*, „Cement, Wapno, Beton” 2007, nr 2, s. 93–103.

[20] Galbenis Ch.T., Tsimas S., *Use of construction and demolition wastes as raw materials in cement clinker production*, „China Particuology” 2006, Vol. 4, No. 2, s. 83–85.

[21] Bernardo G., Marroccoli M., Nobili M., Telesca A., Valenti G.L., *The use of oil well derived drilling waste and electric arc furnace slag as alternative raw materials in clinker production*, „Resources Conservation and Recycling” 2007, Vol. 52, No. 1, s. 95–102.

MAREK GAWLICKI  
GRZEGORZ SIEMIĄTKOWSKI

## CONCRETE WASTE UTILIZATION PRODUCTS

**Keywords:** construction wastes, recycled concrete, aggregate, cement raw meal, burnability.

The processing of used concretes is an important part of the economy with a closed circuit. The basic direction of concrete processing from construction and demolition debris as well as production of wastes generated in prefabrication plants is obtaining aggregates, which can be reused as a component of concrete mixes. The quality of obtained aggregates mainly depends on the type of aggregates used in the processed concrete and the content of the „old” cement paste in them. The work discusses the microstructure and phase composition of cement paste as well as their impact on the basic properties of aggregates obtained from processed concrete. The paper also presents the possibilities of using fine-grained material generated during the crushing of concretes as a raw material for the production of Portland cement clinker.