

Bartosz Zegardło, Dorota Miłkowska, Klaudia Siedlecka, Izabella Szyber

Ocena zależności twardości recyklingowych kruszyw ceramicznych oraz wytrzymałości na ściskanie kompozytów otrzymanych z ich udziałem

JEL: Q53. DOI: 10.24136/atest.2019.208.

Data zgłoszenia: 25.05.2019. Data akceptacji: 22.01.2020.

Praca niniejsza jest kontynuacją cyklu publikacyjnego dotyczącego zastosowania odpadowych materiałów ceramicznych, jako wypełniacza do betonów cementowych. We wcześniejszych publikacjach autorzy dowiedli, że odpowiedni sposób przygotowania ziaren, ich dobór i połączenie z odpowiednio dobranymi pozostałymi składnikami betonu gwarantuje otrzymanie kompozytu cementowego, którego parametry nie odbiegają od tych jakie uzyskuje się przy stosowaniu kruszyw tradycyjnych. Dowiedziono również, że szeroki wybór materiałów ceramicznych produkowanych z różnych glin sprawia, że jakość otrzymywanych z nich betonów jest różna. Do tej pory parametrem określającym jakość kruszywa był badany dla nich wskaźnik rozkruszenia. Wartość wymienionego parametru pozwalała przewidywać maksymalną klasę jakości otrzymywanego betonu. W artykule niniejszym dokonano porównania zależności twardości kruszyw ich wskaźnika rozkruszenia oraz wytrzymałości na ściskanie kompozytów otrzymanych z udziałem analizowanych recyklingowych kruszyw ceramicznych. Wyniki badań wykazały, że badanie twardości podobnie jak badanie wskaźnika rozkruszenia może potencjalnie służyć do szacowania jakości kruszywa recyklingowego w aspekcie wykorzystania go do produkcji betonów.

Słowa kluczowe: recykling, odpady ceramiczne, produkcja betonu.

Wstęp

Budowlane wyroby ceramiczne w aspekcie substancji zagrażającej bezpieczeństwu ekologicznemu są materiałem dość specyficznym. Proces ich produkcji nie jest odwracalny. Zachodzące podczas niego reakcje wiązań ceramicznych nie są możliwe do powtórnego przeprowadzenia, przez co wyroby te nie mogą wrócić do pierwotnej produkcji tak jak to dzieje się np. z wyrobami stalowymi. Ceramikę cechuje również niemożliwość bioutylizacji, którą można stosować w przypadku budowlanych odpadów organicznych (np. drewno). Wyroby ceramiczne są trwałe i niebiodegradowalne, a ich rozkład w środowisku naturalnym szacuje się na około cztery tysiące lat. Rosnący popyt na wyroby ceramiczne sprawia natomiast, że wraz ze wzrostem ich produkcji

odnotowuje się wzrost ilości odpadów deponowanych na wysypiskach oraz co stanowi większy problem na nielegalnych, samowolnych składowiskach odpadów budowlanych.

Wśród przyczyn powstawania odpadów oprócz prozaicznej wymiany elementów na nowe zwraca się uwagę również na duże ilości powstających ceramicznych odpadów poprodukcyjnych. Procesy produkcyjne wyrobów są trudne i precyzyjne. Szacuje się, że przez wysoko postawione wymogi kontroli jakości około 30% całości produkcji zostaje wyselekcjonowana jako gatunek niższy lub odpad poprodukcyjny.

Z przyczyn powyższych wiele instytucji badawczych podjęło próby odszukania racjonalnych sposobów recyklingu budowlanych odpadów ceramicznych. Głównym prezentowanym przez nie kierunkiem jest próba użycia odpadów do produkcji betonów.

W pracy niniejszej odwołując się do wcześniejszych prac badawczych przedstawiono ceramikę jako materiał oraz zaproponowano sposób jej utylizacji przez rozkruszenie i zastosowanie jako wypełniacza w mieszankach betonowych.

Szczególną uwagę zwrócono na różnorodność cech różnych materiałów ceramicznych oraz wynikające z tego różne cechy kompozytów betonowych z nich otrzymywanych. Głównym celem artykułu była ocena zależności twardości kruszyw ich wskaźnika rozkruszenia oraz wytrzymałości na ściskanie kompozytów otrzymanych z udziałem analizowanych recyklingowych kruszyw ceramicznych. Wyniki badań wykazały, że badanie twardości podobnie jak badanie wskaźnika rozkruszenia może potencjalnie służyć do szacowania jakości kruszywa recyklingowego w aspekcie wykorzystania go do produkcji betonów.

1. Odpady ceramiczne jako kruszywo do betonów

Zagadnienie użycia odpadowej materii ceramicznej, jako kruszywa do betonów znane było już w starożytnej Grecji. Wtedy to jednym ze składników wytwarzanych zapraw były drobno zmielone dachówki ceramiczne, które poprawiały jej własności. Ten nurt jednak wraz z rozwojem technologii betonów tradycyjnych pozostał na wiele lat zapomniany. Prowadzone w obecnych czasach prace badawcze nad zastosowaniem ceramiki do betonów obierają wiele kierunków. W literaturze równocześnie napotkamy można opisy badań w których odpady ceramiczne próbuje się

Tab. 1. Cechy kruszywa ceramicznego na tle innych kruszyw stosowanych do betonów [37]

Rodzaj kruszywa/Cecha	Jedn.	Kruszywo tradycyjne: piasek, żwir	Gryz bazaltowy	Kruszywo z recyklingu ceramiki		
				Ceramika czerwona	Ceramika sanitarna	Ceramika glazurująca
Gęstość właściwa	kg/dm ³	2,65	2,6–3,2	1,4*	2,64*	2,2*
Gęstość objętościowa	kg/dm ³	1,8–2,0	2,5–3,1	1,0*	2,36*	2,04*
Wytrzymałość na ściskanie	MPa	22–15	250–400	5–20	60–600	110–360
Moduł sprężystości	10 ² MPa	200–400	560–990	100–300	400–700	200–360
Nasiąkliwość	%	0,6–2,8	0,1–0,4	22,0*	1,53*	2,9*
Wskaźnik rozkruszenia	%	8,0–16,0	3,8	48*	8,9*	15,7*

Tab. 2. Recepta robocza dla betonu C35/45 [37]

Nazwa składnika	Jednostka	Recepta
Cement CEM I 42,5N – SR 3/NA	kg	370
Kruszywo: piaskowo-żwirowe 0/4 mm	kg	667
Kruszywo: Grys bazaltowy 4/8mm	kg	1296
Woda	kg	139
Domieszka ISOFLEX 7130	kg	5,6

wykorzystać jako substytut jedynie części kruszywa jak też takie w których zastosowanie odpadów jest zamiennikiem całego stosu okruczowego. Cele prowadzonych badań również są zróżnicowane. W niektórych pracach jest nim próba utylizacji zalegającej materii w innych próba wynalezienia betonu specjalnego, którego specyficzne cechy uzyskiwane są przez zastosowanie specjalnie przygotowanej materii ceramicznej.

W pracach poświęconych zastosowaniu do kompozytów betonowych ceramiki czerwonej źródła literaturowe [1-16] koncentrują się głównie na efekcie ekologicznym. Wyniki prezentowanych tam badań dowodzą, że tego typu dodatek niezależnie od formy w jakiej go wprowadzono do mieszanki betonowej (proszek lub kruszywo) głównie pogarsza cechy wytrzymałościowe betonu. Znacznie różne skutki prowadzonych badań przedstawiają prace prowadzone na betonach, do których wytworzenia używano ceramiki szlachetnej – białej [17-26]. Materiał ten, który pozyskuje się z odpadowych elementów ceramiki sanitarnej lub technicznej (np. izolatory elektryczne) znamienny jest korzystnie wpływającymi na beton cechami. Prezentowane w pracach wyniki pokazują, że im większy dodatek kruszywa ceramicznego tym parametry wytrzymałościowe betonów są wyższe.

Interesujące cechy betonów wytworzonych z udziałem kruszywa ze stłuczki sanitarnej, której skład zbliżony jest do składu ceramicznych izolatorów elektrycznych przedstawiono w pracy [25]. Autorzy prac poznawczych, aby nadać sens ekonomiczny prowadzonych prac szukają zastosowań specjalnych tego typu betonów. Wyniki badań pokazują, że tego typu betony można z powodzeniem stosować w warunkach gdzie betony są narażone na wysokie temperatury lub w miejscach gdzie jest wymagana wysoka odporność na ścieranie.

Obszerne badania recyklatów ceramicznych pod kątem możliwości ich zastosowania do betonów tradycyjnych przedstawiono w pracy [37]. W związku z tym, że niniejsza praca jest kontynuacją badań przedstawionych w [37] poniżej dokonano bardziej szczegółowego opisu zaprezentowanych tam badań.

Wyboru materii odpadowej do badań w pracy [37] dokonano segregując odpady zalegające na nielegalnych wysypiskach materiałów budowlanych. Wśród porzuconych wyrobów ceramicznych największy odsetek stanowiły odpady ceramiki czerwonej w postaci skruszonych cegieł, pustaków ceramicznych oraz odłamki dachówek. Kolejną materią ceramiczną zalegającą wśród innych odpadów były płytki ceramiczne podłogowe i ściennie występujące jako ścinki oraz płytki stłuczone. Mniej liczną grupę stanowiły fragmenty zużytej ceramiki sanitarnej. Kruszywo posegregowano zgodnie z rodzajem i klasyfikacją odpadów ceramicznych na trzy grupy – ceramikę czerwoną, ceramikę glazurniczą oraz ceramikę sanitarną. Tak pozyskane odpady poddano procesowi kruszenia w kruszarkach szczękowych.

Dla pozyskanego w ten sposób kruszywa przeprowadzono serię badań odpowiadających badaniom kruszyw naturalnych, które wykorzystuje się popularnie do betonów [27-31]. Wyniki badań porównano z wynikami literaturowymi [34] dla najbardziej

Tab. 3. Średnie wartości badanych cech porównywanych betonów[37]

Cecha	Jednostka	Beton na kruszywie z ceramiką czerwoną	Beton na kruszywie z ceramiką glazurniczą	Beton na kruszywie z ceramiką sanitarną	Beton na kruszywie bazaltowym	Beton na kruszywie tradycyjnym żwirowym
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	2,90	5,5	7,1	6,70	4,30
Wytrzymałość na ściskanie	MPa	34,40	49,4	84,6	76,50	49,90

popularnych kruszyw stosowanych na betoniarniach towarowych oraz innych kruszyw recyklingowych. Wyniki badań na tle wyników dla innych kruszyw przedstawiono w tab. 1.

Opierając się na receptie roboczej dla betonu C35/45 którego głównym składnikiem było kruszywo bazaltowe przygotowano beton, w którym zamiennikiem piasku było kruszywo z odpadów ceramicznych uziarnienia drobnego – 0-4mm, zamiennikiem grys bazaltowego było kruszywo ceramiczne uziarnienia grubego 4-8 mm. Skład wyjściowego betonu przedstawiono w tab. 2.

Dla porównania wyników oprócz próbek z kruszywem bazaltowym przygotowano próbki z kruszywem tradycyjnym żwirowym. Badania betonów przeprowadzono na podstawie [32-35] Wyniki badań betonów ceramicznych wraz z wynikami porównawczymi zamieszczono w tab. 3.

Wyniki badań wytrzymałościowych betonów wskazały na jednoznacznie poprawę cech uzyskanego betonu po zastąpieniu kruszywa tradycyjnego kruszywem ceramicznym uzyskanym z rozkruszenia odpadów ceramiki sanitarnej. Pomimo uzyskania bardzo dobrych parametrów dla betonu recepturowego zawierającego w swym składzie kruszywo bazaltowe (wytrzymałość na ściskanie 76,50MPa wytrzymałość na rozciąganie 6,7MPa) dla kruszywa recyklingowego ceramiki sanitarnej otrzymano wyniki odpowiednio o 10,5% dla wytrzymałości na ściskanie oraz o 5,9% wytrzymałości na rozciąganie wyższe (wytrzymałość na ściskanie 84,60MPa wytrzymałość na rozciąganie 7,1MPa).

Beton zawierający w swym składzie w całości kruszywo ceramiki czerwonej posiadał parametry niższe o odpowiednio 56% i 55%. Beton wytworzony z udziałem kruszywa glazurniczego posiadał niższe parametry niż beton porównawczy bazaltowy odpowiednio o 17 % i 35% jednak jego parametry niemal jednakowe były z parametrami uzyskanymi dla betonu żwirowego.

2. Badanie twardości kruszyw ceramicznych

Kolejną pracą do której odwołano się dokonując porównania cech w niniejszym artykule jest [38]. W pozycji tej zaprezentowano ocenę twardości recyklatu ceramicznego jako potencjalny sposób oceny jakości kruszywa odpadowego.

Twardość jest cechą ciał stałych przedstawiającą ich odporność na działanie sił skupionych. Badanie twardości jest podstawowym badaniem służącym do badania jakości materiałów metalowych. Do oceny jakości stali stosuje się wiele metod oraz skal, które umożliwiają szybki i skuteczny pomiar rozpoznawczy. Większość z nich polega na zagłębieniu w badany materiał specjalnych wgłębników oraz ocenie jak dany materiał poddaje się danej czynności. W zależności od wybranej metody badacze posługują się różnymi wgłębnikami jak i różnymi sposobami oceny zagłębienia. Wśród wgłębników wyróżnia się stalowe kule, stożki, elementy diamentowe. Przy ocenie zagłębienia

Tab. 4. Wyniki pomiarów twardości kruszyw ceramicznych oraz porównawczych metodą Rockwella – skala HRC

Lp.	Rodzaj kruszywa	Ilość prób	Wartość średnia odczytu HRC	Odchylenie standardowe	Wskaźnik zmienności %
1	Ceramika czerwona	40	60,15	1,71	2,84
2	Ceramika glazuryczna	40	37,65	1,39	3,68
3	Ceramika sanitarna	40	23,85	0,68	2,85
4	Kruszywo bazaltowe	40	17,20	0,48	2,79
5	Kruszywo żwirowe	40	38,30	8,20	21,41

poddaje się analizie: głębokość zagłębienia, średnicę odcisku itp. Ze względu na wielość metod oraz możliwych do wykorzystania przyrządów badawczych do prób własnych zaprezentowanych w [38] użyto jedno z najpopularniejszych na rynku urządzenie: twardościomierz Rockwella. Próbkę do badań przygotowano w formie prostopadłościanów o wymiarach około 4x4x2cm. Próbkę wycięto z elementów ceramicznych przy pomocy szlifierki kątowej. Każdą z próbek poddano obciążeniom zgodnie ze schematem przyjętym tak jak dla badania elementów metalowych tj. zgodnie ze specyfikacją przyrządu. Każdą z próbek kolejno umieszczano na stoliku przedmiotowym i regulując jego położenie doprowadzano do kontaktu z wgłębnikiem. Przy pomocy śruby podnoszącej zagłębnik w próbce z siłą tzw. wstępnej. W tym momencie następowała kalibracja skali zagłębienia. Następnie po wciśnięciu przycisku startowego za pomocą dźwigni do wgłębnika przykładano siłę właściwą wynoszącą 1,5kN. Ruch dźwigni zagłębiającej się wraz z wgłębnikiem w materiał próbki napędzał jednocześnie wskaźnik wyskalowany dla odpowiedniej skali twardości – w tym przypadku tzw. HRC. Im materiał był twardszy tym wskaźnik miernika twardości zagłębiał się mniej w materiał. Jako próbki porównawcze posłużyły próbki wycięte z otoczków (żwir) oraz brył bazaltowych. Wyniki pomiarów dla poszczególnych próbek przedstawiono w tab 4.

Analizując wyniki badań zauważono że dla poszczególnych kruszyw ceramicznych wyniki jakie otrzymywano różniły się w stopniu nieznacznym w obrębie jednej badanej grupy. W związku z różnym materiałem otoczkowym badania prowadzone na kruszywie żwirowym wykazywały wysoki współczynnik zmienności.

3. Ocena zależności twardości kruszyw ich wskaźnika rozkruszenia oraz wytrzymałości na ściskanie kompozytów otrzymanych z udziałem analizowanych recyklingowych kruszyw ceramicznych

Wyniki otrzymanych twardości zaprezentowanych w [38] zestawiono w sposób tabelaryczny z wynikami pomiarów wskaźników rozkruszenia jak i otrzymanymi w pracy [37] wartościami wytrzymałości na ściskanie betonów uzyskanych z danych kruszyw (tab. 5)

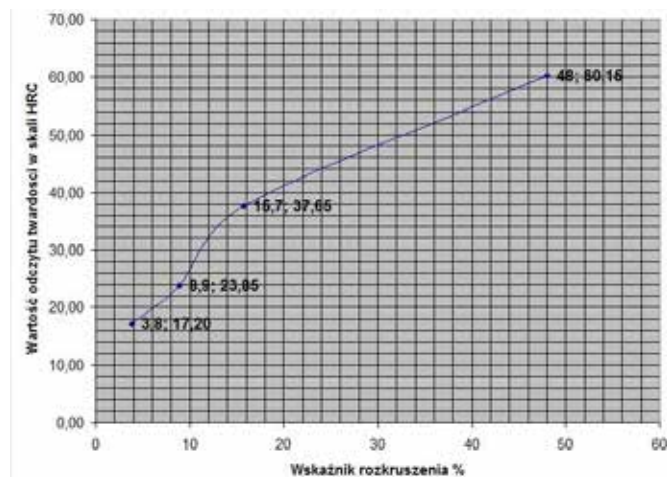
Analizując zależność zbadanej twardości oraz wskaźników rozkruszenia dla kolejnych kruszyw ceramicznych już w pracy [37] zaobserwowano niemal liniową zależność wymienionych wartości. Porównania tych parametrów dla kruszywa bazaltowego odbiegały nieco od zależności jaką prezentowały wyroby ceramiczne. Prawdopodobnie wynikało to z odmiennej budowy bazaltu i materiałów ceramicznych które to zostały zaprezentowane na obrazach mikroskopowych w pracy [37]. Struktura bazaltu była zwięzła, zwarta zaś kruszyw ceramicznych - otwarta i porowata.

Analiza porównawcza twardości badanych kruszyw oraz otrzymanych zbadanych wytrzymałości wykonanych z nich betonów

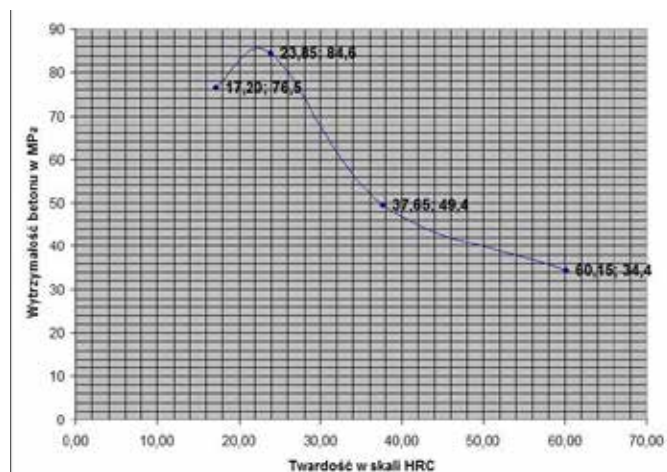
Tab. 5. Porównanie wartości zbadanych: twardości, wskaźnika rozkruszenia oraz wytrzymałości na ściskanie otrzymanego z danego kruszywa betonu

Lp.	Rodzaj kruszywa	Wartość średnia odczytu twardości w skali HRC	Wskaźnik rozkruszenia - wartość średnia w %	Wytrzymałość na ściskanie otrzymanego betonu - wartość średnia w MPa
1	Ceramika czerwona	60,15	48	34,4
2	Ceramika glazuryczna	37,65	15,7	49,4
3	Ceramika sanitarna	23,85	8,9	84,6
4	Kruszywo bazaltowe	17,20	3,8	76,5

również wykazywała niemal na liniową zależność i wraz z rosnącą zbadaną twardością obserwowano rosnące wytrzymałości (malejący wskaźnik HRC - świadczy o rosnącej twardości) Dla kruszyw porównawczych bazaltowych zależność ta zdecydowanie nie wpisywała się do opisanej systematyki. Porównując otrzymane wartości dla kruszywa o najbardziej zbliżonej twardości – z ceramiki sanitarnej 23,85 oraz bazaltu 17,20 obserwuje się że otrzymane wartości wytrzymałości betonu dla ceramiki sanitarnej są wyższe o 10,6% od kruszywa porównawczego - wytrzymałość dla ceramiki sanitarnej: 84,6MPa, dla bazaltu: 76,5MPa. Ten stan rzeczy



Rys. 1. Zależność pomiędzy twardością zbadaną, a wskaźnikiem rozkruszenia



Rys. 2. Zależność pomiędzy twardością kruszywa, a wytrzymałością uzyskaną z danego kruszywa betonu

może mieć przyczynę w jakości styku pomiędzy kruszywem oraz zaczynem. Otwartość porów w kruszywie ceramicznym pozwala na penetrację zaczynu w głąb kruszywa co poprawia jego jakość. Dzięki temu kruszywo o niższej twardości zastosowane w połączeniu z tej samej jakości zaczynem finalnie daje kompozyt o wyższych parametrach wytrzymałościowych.

Podsumowanie

Na podstawie analiz przeprowadzonych w niniejszym artykule stwierdzono że:

1. Przedstawione wyniki badań wskazują na istnienie zależności pomiędzy zbadaną twardością, wskaźnikiem rozkruszenia oraz zbadaną wytrzymałością na ściskanie otrzymanego z danego kruszywa betonu.
2. W obrębie badanych materiałów ceramicznych zależności pomiędzy zbadaną twardością, wskaźnikiem rozkruszenia i wytrzymałością otrzymanych z nich kompozytów betonowych są zbliżone do liniowych.
3. Zależność pomiędzy zbadaną twardością, wskaźnikiem rozkruszenia i wytrzymałością kompozytów betonowych dla kruszyw tradycyjnych nie wpisują się w zależności liniowe zaobserwowane dla kruszyw ceramicznych co wynika prawdopodobnie z ich odmiennej budowy.
4. Przedstawiona metoda porównań wyników badań twardości kruszyw ceramicznych (o podobnej budowie fizycznej) może służyć do kontroli jakości utylizowanego materiału ceramicznego.
5. Ocena twardości może wskazać potencjalne niewidoczne dla oka uszkodzenia wewnętrzne występujące w obrębie kruszywa ceramicznego pochodzące np. od procesów zamrażania i rozmrażania recyklatu składowanego w środowisku zewnętrznym.
6. Dzięki dostępnym na rynku urządzeniom przenośnym do pomiaru twardości metoda ta może służyć badaniom polowym. Opierając się na niej oraz prezentowanych w niniejszej pracy wykresach można dokonać zgrubnego szacowania wytrzymałości na ściskanie kompozytu betonowego, który ma być wykonany w oparciu o daną odpadową materię ceramiczną.

Bibliografia:

1. Bektas F., Wang K., Ceylann H., *Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability*, "Constr Build Mater" 2009, 23, pp. 1909–1914.
2. Binici H., *Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortar properties*, "Constr Build Mater" 2007, 21, pp. 1191–1197.
3. Cachim P., *Mechanical properties of brick aggregate concrete*, "Constr Build Mater" 2009, No. 21, pp. 1292–1297.
4. Correia J.R., De Brito J., A.S. Pereira *Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates*, "Mater Struct" 2006, 39, pp. 169–177.
5. De Brito J., Pereira A.S., Correia J.R., *Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates*, "Cem Concr Compos" 2005, 27, (4), pp. 429–433.
6. Debieb F., Kenai S., *The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete*, "Constr Build Mater" 2008, Vol. 22, pp. 886–893.
7. Devenny A., Khalaf F.M., *The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete*, "Masonry Int" 1999, 12 (3), pp. 81–84.
8. Khalaf F.M., DeVenny A.S., *Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review* "J Mater Civ Eng" 2004, 16 (4), pp. 331–340.
9. Khaloo A.R., *Properties of concrete using crushed clinker bricks as coarse aggregate*, "ACI Mater J" 1994, 91 (2) pp. 401–407.
10. Khatib J.M., *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*, "Cem Concr Res" 35 (4) 2005, pp. 763–769.
11. Levy S.M., Halene P., *Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development*, "Cem Concr Res" 2004, 34 (18), pp. 1975–1980.
12. Mansur M.A., Wee T.H., Charan L.S., *Crushed bricks as coarse aggregate for concrete*, "ACI Mater J" 1999, 96 (4), pp. 478–483.
13. Mazumder A.R., Kabire A., Yazdani N., *Performance of over-burnt distorted bricks as aggregates in pavement works*, "J Mater Civ Eng" 2006, 18 (6), pp. 777–785.
14. Pacheco-Torgal F., Jalali S., *Reusing ceramic wastes in concrete*, "Constr Build Mater" 2010, 24, pp. 832–838.
15. Poon C.S., Chan D., *Paving blocks with recycled aggregate and crushed clay brick*, "Constr Build Mater" 2006, 20 (8), pp. 569–577.
16. Rashid M.A., Hossain T., Islam M.A., *Properties of higher strength concrete with crushed brick as coarse aggregate*, "J Civ Eng" (IEB) 2009, 37 (1), pp. 43–52.
17. Guerra I., Vivar I., Lamas., Juan A., Moran J., *Eco-efficient concretes: the effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete*, "Waste Manage" (Oxford) 2009, 29, pp. 643–646.
18. Higashiyama H., Yagishita F., Sano M., Takahashi O., *Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate*, "Constr Build Mater" 2012, 26, pp. 96–101.
19. Medina C., Frías M., Sánchez de Rojas M.I., *Microstructure and properties of recycled concretes using sanitary ware industry waste as coarse aggregate*, "Constr Build Mater" 2012, 31, pp. 112–118.
20. Medina C., Sánchez de Rojas M.I., Frías M., *Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes*, "Cem Concr Compos" 2012, 34, pp. 48–54.
21. Senthamarai R.M., Devadas Manoharan P., *Concrete with ceramic waste aggregate*, "Cement Concr Compos" 2005, 27, pp. 910–913.
22. Senthamarai R.M., Devadas Manoharan P., Gobinath D., *Concrete made from ceramic industry waste: durability properties*, "Constr Build Mater" 2011, 25, pp. 2413–2419.
23. Lopez, Llamas B., Juan A., Moran J.M., Guerra I., *Eco-efficient concretes: impact of use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete*, "Biosyst Eng" 2007, 96 (4), pp. 559–564.
24. Medina C., Banfill P.F.G., Sánchez de Rojas M.I., Frías M., *Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste*, "Constr Build Mater" 2013, 40, pp. 822–831.
25. Halicka A., Ogrodnik P., Zegardło B., *Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate*, "Construction and Building Materials" 2013, 48, pp. 295–305.
26. Zegardło B., Szeląg M., Ogrodnik P., *Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes – The method of production and the interfacial*

- transition zone "Construction and Building Materials" 2016, Vol. 122, pp. 736-742.
27. PN-EN 933-1:2012. Test of geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution – sieving method.
 28. PN-EN 12620:2002. Aggregate for concrete.
 29. PN-EN 1097-6: 2011. Tests for mechanical and physical properties of aggregate. Part 6: Determination of particle density and water absorption.
 30. PN-EN 1097-7:2001. Tests for mechanical and physical properties of aggregate. Part 7: Determination of particle density of filler – Pycnometer method.
 31. PN-B-06714-40:1978. Mineral aggregates. Testing. Determination of crushing strength.
 32. Neville AM., Properties of concrete, "VI Polish Edition, Polski Cement" Warsaw 2000.
 33. PN-EN 12390-3:2006. Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.
 34. Jamroz Z., *Concrete and its Technologies*, "Wydawnictwo Naukowe PWN" Warszawa 2006 [in Polish].
 35. Awgustinik A. J., *Ceramika*, „Arkady”, Warszawa, 1980.
 36. Kleinrok D., Kordek M., *Technologia ceramiki cz. 3*, „Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne”, Warszawa, 1978.
 37. Zegardło B., Brzyski P., Rymuza K., Bombik A., *Analysis of the Effects of Aggressive Environments Simulating Municipal Sewage on Recycled Concretes Based on Selected Ceramic Waste*, "Materials" 2018, 11(12), pp. 2565 – 2587.
 38. Ogródnik P., Zegardło B., Pieniak D., *Badanie twardości jako metoda oceny jakości recyklingowych kruszyw ceramicznych do betonów*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2017, 2(62), pp. 25-37.

Evaluation of dependence of hardness of recycled ceramic aggregates and compressive strength of composites obtained with their participation

Based on the analysis carried out in this article, it was found that:

1. The presented test results indicate the existence of a relationship between the examined hardness, the crushing index and the tested compressive strength obtained from a given concrete aggregate.
2. Within the ceramic materials under investigation, the dependences between the hardness tested, the crushing index and the strength of concrete composites obtained from them are similar to linear ones.
3. The relationship between the hardness tested, the crushing index and the strength of concrete composites for traditional aggregates does not match the linear relationships observed for ceramic aggregates, which probably results from their different construction.
4. The presented method of comparison of hardness test results of ceramic aggregates (with similar physical structure) can be used to control the quality of utilized ceramic material.
5. The assessment of hardness may indicate potential invisible to the eye internal damages occurring within the ceramic aggregate, eg from the freezing and thawing processes of the recycled stored in the external environment.
6. Thanks to commercially available portable devices for measuring hardness, this method can be used for field research. Based on it and the graphs presented in this work, it is possible to roughly estimate the compressive strength of a concrete composite that is to be made based on a given waste ceramic matter.

Keywords: recycling, ceramic waste, concrete production.

Autorzy:

dr inż. **Bartosz Zegardło** – Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach, Wydział Przyrodniczy, Katedra Metod Ilościowych i Gospodarki Przestrzennej

Dorota Miłkowska – Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach

Klaudia Siedlecka – Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach

Izabella Sztyber – Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach