

mł. brg. dr inż. Paweł Ogrodnik

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

dr inż. Bartosz Zegardło

Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach

dr inż. Daniel Pieniak

Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie

Badanie twardości jako metoda oceny jakości recyklingowych kruszyw ceramicznych do betonów

Abstrakt

Celem przedstawionych w artykule badań była ocena jakości kruszywa recyklingowego przy wykorzystaniu nienormatywnej metody pomiaru jego twardości. W artykule przedstawiono różne rodzaje ceramiki, zwracając uwagę na ich nietypową budowę mikroskopową, w której cechą podstawową były występujące w dużych ilościach pory w objętości badanego materiału. Cecha ta pozwala postawić tezę, że podczas zagłębiania wgłębnika w strukturę materiału ceramicznego, ścianki pomiędzy porami, kruszyć się będą pod wpływem siły z różną intensywnością. Analogicznie jak dzieje się to w przypadku badań materiałów metalowych, parametrem służącym ocenie była głębokość penetracji wgłębnika. Badaniom poddano kruszywa ceramiczne z ceramiki czerwonej, glazurniczej i sanitarnej. Przedstawione wyniki badań odniesiono do wskaźnika rozkruszenia i finalnej wytrzymałości na ściskanie otrzymanego z kruszyw.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników stwierdzono, że przedstawiona metoda badań może być wykorzystywana przy szacowaniu jakości kruszywa ceramicznego i może stanowić alternatywę dla badań wytrzymałościowych tego typu kruszyw. Artykuł jest kontynuacją cyklu publikacji dotyczących zastosowania odpadowych materiałów ceramicznych jako wypełniacza do betonów cementowych wykazujących szereg szczególnych cechy, w tym dużej odporności na oddziaływanie temperatur pożarowych. Do tej pory parametrem określającym jakość kruszywa był badany wskaźnik rozkruszenia. Wartość wymienionego parametru pozwalała przewidywać maksymalną klasę wytrzymałości otrzymywanego betonu.

Słowa kluczowe: twardość, beton, kruszywo ceramiczne

Hardness Test as the Method Evaluating the Quality of Recycled Ceramic Aggregates used for Concrete

Abstract

The aim of the presented test results was the evaluation of the quality of recycled aggregate using non – standard method to measure its hardness. The article presents various kinds of ceramic, considering their non-typical microscopic structure with a lot of pores in the examined material. The thesis, that, while the penetrator enters the ceramic material, the walls between the pores may crush with different intensity, can be put. As in case of the metal material tests, the parameter for the evaluation was the depth of the penetration. The tests were carried out on the following ceramic aggregates: red, glaze and sanitary ceramic. The results have been referred to crushing indicator and to the final strength on the compression.

On the basis of the results, it has been found, that the presented testing method may be used for the evaluation of the ceramic aggregate and may be the alternative to the strength test used for such aggregates. The article is the continuation of the publication dealing with the use of the recycled ceramic materials as the filler for the cement concrete with some particular features, including the high resistance on fire temperatures. So far, the parameter describing the quality of the aggregate has been the tested crushing indicator. The mentioned indicator helps to predict the maximum strength of the obtained concrete.

Keywords: hardness, concrete, ceramic aggregate

1. Wstęp

Obserwowana w ostatnich latach degradacja środowiska naturalnego wywołana szybkim rozwojem cywilizacyjnym sprawiła, że jednym z priorytetów obecnej nauki jest bezpieczeństwo ekologiczne. Ze względu na dostępność wielu dóbr, które trafiają do coraz szerszej liczby odbiorców, stale rosną wielkości produkowanych odpadów. Rosnący standard życia sprawia, że wykorzystywane jeszcze do niedawna przedmioty w długim okresie czasu coraz częściej wymienia się na nowe, pomimo tego że nie wymagają tego względy eksploatacyjne. Szczególnie niekorzystnym jest nasilenie się produkcji w sektorach przemysłu, które zużywają duże ilości energii oraz wytwarzają znaczne ilości odpadów poprodukcyjnych. Tego typu przemysłem jest produkcja wy-

robów ceramicznych. Poza zużyciem wielkich porcji ciepła niezbędnego do przeprowadzenia procesów produkcyjnych przemysł ten, ze względu na szereg skomplikowanych czynników, wytwarza duże ilości odpadów poprodukcyjnych. Stanowią je m.in. produkty wadliwe, które nie nadają się do sprzedaży.

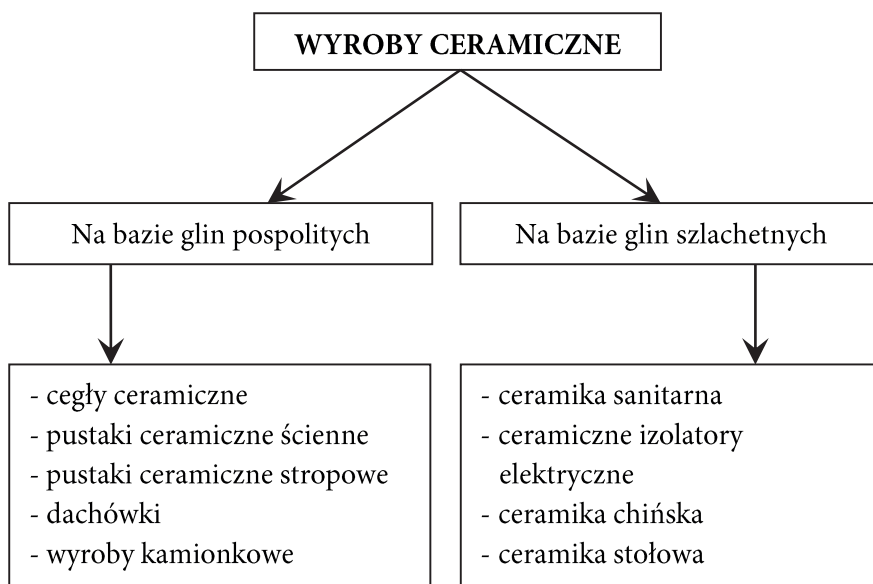
W pracy przedstawiono ceramikę jako materiał odpadowy oraz zaproponowano sposób jego utylizacji przez rozkruszenie i zastosowanie, jako wypełniacza w mieszankach betonowych. Szczególną uwagę należy zwrócić na różnorodność cech materiałów ceramicznych oraz wynikające z tego cechy otrzymywanych z nich kompozytów betonowych. Porównane zostały wyniki badań kruszyw i kompozytów. Parametrem korelacyjnym był badany wskaźnik rozkruszenia. Cechą znaną dla kruszyw wytworzonych z odpadów ceramicznych były występujące w dużych ilościach pory w objętości materiału. Cecha ta pozwoliła założyć, że podczas zagłębiania węgelnika w strukturę materiału ceramicznego ścianki pomiędzy porami kruszyć się będą pod wpływem siły z różną intensywnością. Badaniom poddano kruszywa ceramiczne z ceramiki czerwonej, glazurniczej i sanitarnej. Przedstawione wyniki badań odniesiono do wskaźnika rozkruszenia i finalnej wytrzymałości na ściskanie otrzymanego z kruszyw betonu.

2. Przemysł ceramiczny w świetle zagrożenia bezpieczeństwa ekologicznego

Pojęcie „ceramika” wywodzi się z greckiego słowa „keramos” – glina, ziemia. Pojęcie to obejmuje wyroby wytwarzane z różnego rodzaju glin oraz rzemiosło związane z procesem produkcji. Wyroby ceramiczne podzielić można ze względu na zastosowane do ich wykonania surowce [19, 21] (rys. 1.), które, w zależności od składu chemicznego, wpływają na uzyskiwany po wypaleniu kolor. Elementy konstrukcyjne stosowane w budownictwie powstają zazwyczaj z glin pospolitych, o zabarwieniu od żółto-czerwonego, przez zielonkawe, do brunatnego, co świadczy o zawartości barwiących związków żelaza i tytanu. Podstawowymi składnikami mas używanych do produkcji ceramiki sanitarnej są gliny szlachetne oraz kaolin, które zachowują po wypaleniu kolor biały.

W tabeli 1 przedstawione zostały składy tlenkowe mas ceramicznych stosowanych do produkcji wybranych wyrobów. Niezależnie od przeznaczenia produktów, dominującymi składnikami są tlenki krzemu i glinu. Ich zawartość jest zależna od rodzaju użytej gliny i wynosi zwykle 80–90% masy. Stosunek

krzemionki do tlenku glinu jest równy i odpowiada proporcji 3÷1. Zmniejszenie tej proporcji, np. do 2,5÷1, zwiększa podatność wyrobów na deformacje podczas wypalania [19]. Skłonność do odkształceń przy wypalaniu powoduje także wysoka zawartość alkaliów, a szczególnie tlenku sodu. W masach używanych do produkcji ceramiki sanitarnej, ze względu na walory estetyczne, sumaryczna zawartość tlenków żelaza i tytanu nie może przekraczać 1% [21].



Rys. 1. Podział wyrobów ceramicznych ze względu na rodzaj surowca

Źródło: [20]

Tabela 1. Skład chemiczny mas stosowanych do produkcji wybranych wyrobów ceramicznych

Rodzaj wyrobów	Zawartość związków w masie [%]							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Ceramika z czerwonych glin dwukrotnie wypalana	51,7	18,2	6,1	6,1	2,4	0,2	4,6	0,8
Ceramika z białych glin jednokrotnie wypalana	58,0	18,0	1,0	8,3	0,6	0,2	1,2	0,8

cd. Tabeli 1.

Rodzaj wyrobów	Zawartość związków w masie [%]							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Ceramika z białych glin dwukrotnie wypalana	59,8	18,6	1,7	5,5	3,5	1,6	2,5	0,4
Płytki gresowe z glin czerwonych	59,1	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

Źródło: opracowanie własne na podstawie [21]

Procesy produkcyjne budowlanych wyrobów ceramicznych są nieodwracalne. Zachodzące podczas nich 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). Rosnący popyt na wyroby ceramiczne sprawia, 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 progi jakościowe około 30% całości produkcji zostaje wyselekcjonowana jako gatunek niższy lub odpad poprodukcyjny [22]. Między innymi z tych przyczyn poszukiwane są metody recyklingu budowlanych odpadów ceramicznych. Jednym z kierunków jest próba użycia odpadów do produkcji betonów posiadających specyficzne cechy, w tym dużą odporność na temperatury występujące w czasie pożaru.

3. Odpadowy materiał ceramiczny jako kruszywo do betonów

Zagadnienie wykorzystania odpadowej materii ceramicznej jako kruszywa do betonów, znane było już w starożytnej Grecji. Wtedy to jednym ze składników zapraw były drobno zmielone cząstki ceramiki czerwonej, które poprawiały jej własności. Obecnie prowadzone prace badawcze nad zastosowaniem ceramiki do betonów obierają szereg różnych kierunków. Odpady ceramiczne próbuje się wykorzystać jako substytut jedynie części kruszywa. W innych przypadkach zastosowanie odpadów jest zamiennikiem całego stosu okruszowego kruszywa do betonu.

Z analizy dostępnych badań literaturowych [1–6] wynika, że w przypadku ceramiki czerwonej badacze koncentrują się głównie na efekcie ekologicznym. Wyniki badań dowodzą, że tego typu dodatek, niezależnie od formy, w jakiej go wprowadzono do mieszanki betonowej (proszek lub kruszywo), zasadniczo pogarsza cechy wytrzymałościowe betonu. Odwrotne wyniki uzyskali badacze, którzy wykorzystywali jako kruszywa ceramikę szlachetną – białą [7–12]. Materiał ten pozyskuje się z odpadowych elementów ceramiki sanitarnej lub też technicznej (np. izolatory elektryczne). Uzyskane wyniki opisują, że im większą wykorzystano ilość dodatku kruszywa ceramicznego, tym parametry wytrzymałościowe wytworzonych betonów są wyższe. Interesujące cechy betonów wykonanych na bazie kruszywa ze stłuczki sanitarnej, której skład zbliżony jest do składu ceramicznych izolatorów elektrycznych przedstawiono w pracy [11]. Wyniki badań wskazują, że tego typu betony można stosować w warunkach, gdzie są one narażone na wysokie temperatury lub w miejscach, gdzie jest wymagana wysoka odporność na ścieranie.

Obszerne badania materiałów ceramicznych pod kątem możliwości ich zastosowania do betonów tradycyjnych przedstawiono w pracach [11–12]. Kruszywo użyte do badań własnych zebrano ze składowisk oraz posegregowano zgodnie z rodzajem i klasyfikacją odpadów ceramicznych na trzy grupy – ceramikę czerwoną, ceramikę glazurniczą oraz ceramikę sanitarną. Dla pozyskanego w ten sposób kruszywa przeprowadzono serię badań odpowiadających badaniom kruszyw naturalnych [13–17]. Wyniki badań porównano z dostępnymi w literaturze [20–21] i przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości fizyczne i techniczne kruszywa ceramicznego na tle innych kruszyw stosowanych do betonów

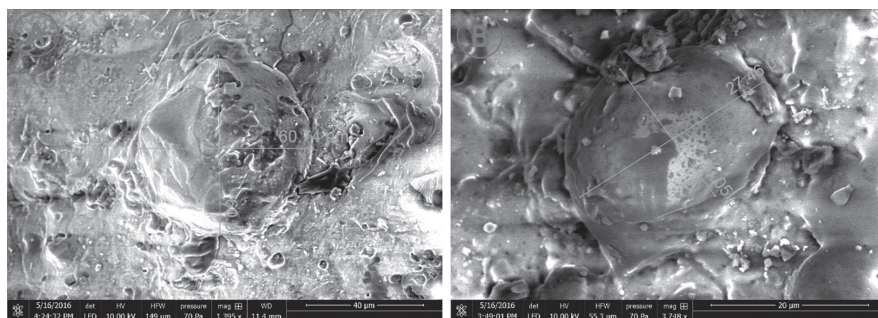
Rodzaj kruszywa / Właściwości	Jedn.	Piasek, żwir	Grys bazaltowy	Kruszywo z recyklingu ceramiki		
				Ceramika sanitarna	Ceramika glazurnicza	Ceramika czerwona
Gęstość	[kg/dm ³]	2,65	2,6–3,2	2,64*	2,2*	1,4*
Gęstość pozorna	[kg/dm ³]	1,8–2,0	2,5–3,1	2,36*	2,04*	1,0*
Wytrzymałość na ściskanie	[MPa]	22–45	250–400	60–600	110–360	5–20
Moduł sprężystości	[GPa]	20–40	56–99	40–70	20–36	10–30
Nasiąkliwość	[%]	0,6–2,8	0,1–0,4	1,53*	2,9*	22,0*
Wskaźnik rozkruszenia	[%]	8,0–16,0	3,8	8,9*	15,7*	48*

Źródło: [12]

*dane uzyskane w badaniach własnych

4. Budowa mikroskopowa kruszyw ceramicznych

Do badań struktury mikroskopowej kruszyw ceramicznych wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy FEI Quanta 650 FEG. Na fotografiach zamieszczono obrazy SEM struktury wybranych ziaren ceramicznych.



Rys. 2. Struktura SEM ziaren ceramicznych, A) kruszywo z ceramiki sanitarniej, B) kruszywo z ceramiki glazurniczej

Źródło: opracowanie własne

Jak widać na fotografiach (rys. 2), struktura budowy kruszyw we wskazanych przypadkach jest różna, co jest wynikiem użycia różnych substratów do ich produkcji, jest również wynikiem różnych procesów technologicznych, takich jak stopień zmielenia glin czy temperatura wypału. Natomiast cechą wspólną są obserwowane pory w objętości materiału. Na fotografiach zauważalne jest, że ściany porów mają różną strukturę, jak i rozmieszczenie ich w materiale również ma różną intensywność. Wymienione cechy pozwoliły na zaproponowanie badania jakości przedstawionego materiału przy pomocy badania twardości.

5. Badanie twardości kruszyw ceramicznych

5.1. Metodyka wykonania badań twardości

Twardość materiałów związana jest z naturą wiązań chemicznych i jej wpływem na przemieszczenie dyslokacji w metalach i ceramice. Podczas odkształcenia plastycznego w próbie twardości istniejące w materiale dyslokacje ulegają poślizgowi, w związku z tym w takiej próbie mierzy się opór, jaki pokonują przemieszczające się w danym materiale dyslokacje [19]. Do określenia twardości stali stosuje się wiele metod oraz skal, które umożliwiają szybki i skuteczny pomiar kontrolny. Większość z nich polega na zagłębianiu w badany materiał specjalnych wgłębników oraz na ocenie stanu powierzchni materiału. Wśród stosowanych wgłębników wyróżnia się stalowe kule, stożki, a także ostrosłupy diamentowe. Przy ocenie zagłębienia poddaje się analizie: głębokość zagłębienia, średnicę odcisku itp. Ze względu na różnorodność metod oraz możliwych do wykorzystania przyrządów badawczych, w badaniach wykorzystano jedno z najpopularniejszych na rynku urządzeń: twardościomierz Rockwella typu 600A.

5.2. Materiał i wykonanie pomiarów twardości

Próbki do badań przygotowano w formie prostopadłościanów o wymiarach około $40 \times 40 \times 20$. Grubość próbek podyktowana była koniecznością zachowania ich niezmiennej postaci podczas badania. Próbki o mniejszych rozmiarach pękały pod wpływem siły obciążającej.

Każdą z próbek poddano obciążeniu wstępnemu wynoszącemu 98 N, a następnie głównemu wynoszącemu 1373 N – zgodnie ze schematem przyjętym

w normie [18]. Każdą z próbek umieszczano kolejno na stoliku przedmiotowym i regulując jego położenie, doprowadzano do kontaktu z wgłębnikiem. Przy pomocy śruby podnośnej zagłębiono wgłębnik w próbce przy obciążeniu wstępnym. W tym momencie następowała kalibracja skali zagłębienia. Następnie, po uruchomieniu przycisku startowego za pomocą dźwigni, do wgłębnika przykładano obciążenie główne. Całkowita wartość obciążenia wynosiła 1471 N. Odpowiada to skali C pomiaru twardości w metodzie Rockwella. Ruch dźwigni zagłębiającej się wraz z wgłębnikiem w materiał próbki napędzał jednocześnie wyskalowany czujnik zegarowy z podziałką podzieloną na 100 działek. Jako próbki porównawcze wykorzystano próbki wycięte z otoczków (żwir) oraz brył bazaltowych. Wyniki pomiarów dla poszczególnych próbek przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki pomiarów twardości kruszyw ceramicznych oraz porównawczych metodą Rockwella – skala HRC

Lp.	Rodzaj kruszywa	N	Średnia wartość HRC	Odchylenie standardowe	Wskaźnik zmienności [%]
1	Ceramika czerwona	40	60,15	1,71	2,84
2	Ceramika glazurnicza	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

Źródło: opracowanie własne

Należy zauważyć, że dla wybranych kruszyw ceramicznych otrzymywano wyniki w obrębie jednej badanej grupy różniły się nieznacznie. W przypadku kruszywa żwirowego wyniki wykazywały wysoki współczynnik zmienności i nie brano ich pod uwagę w dalszej analizie.

6. Analiza wyników badań

Wyniki otrzymanych twardości HRC zestawiono z wynikami pomiarów wskaźników rozkruszenia i przedstawiono w tabeli 4 oraz na rys. 3. Badanie wskaźnika rozkruszenia wykonano na kruszywach o uziarnieniu 4÷8 mm,

zgodnie z [17]. Stanowisko badawcze wyposażono w naczynie do odmierzania porcji kruszywa, wagę laboratoryjną oraz sito o oczku 1 mm. Badanie wytrzymałości wykonano na prasie hydraulicznej Walter+Bai AG, stosując specjalne naczynie z tłokiem do rozkruszania kruszywa. Przeprowadzono trzy próby dla każdego rodzaju kruszyw. Wskaźnik rozkruszenia ustalono jako procentowy udział ziaren, które po rozkruszeniu nie przeszły przez sito o oczku 1 mm:

$$X_r = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100\%$$

gdzie:

m – masa kruszywa użytego do badania o objętości około 1,8 dm³,

m_1 – masa kruszywa po rozkruszeniu i odsianiu ziaren mniejszych niż 1mm.

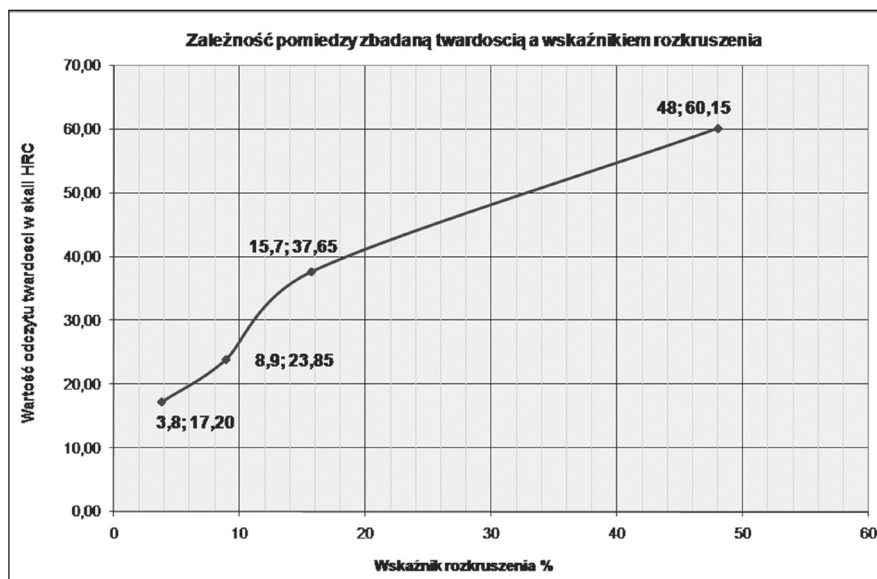
Tabela 4. Porównanie średnich twardości HRC i średnich wskaźników rozkruszenia kruszyw

Lp.	Rodzaj kruszywa	Wartość średnia HRC	Wskaźnik rozkruszenia – wartość średnia w %
1	Ceramika czerwona	60,15	48
2	Ceramika glazurnicza	37,65	15,7
3	Ceramika sanitarna	23,85	8,9
4	Kruszywo bazaltowe	17,20	3,8

Źródło: opracowanie własne

Analizując zależność zbadanej twardości oraz wskaźników rozkruszenia dla przebadanych kruszyw ceramicznych, obserwuje się niemal liniową zależność wymienionych wartości, którą można opisać równaniem $y = 16,9183 + 0,9316 x$. Dobre dopasowanie rozkładu empirycznego z modelowym potwierdza wysoka wartość współczynnika determinacji – $R^2 = 0,9519$. Analiza porównania tych parametrów (wskaźnika rozkruszenia i twardości HRC) dla kruszywa bazaltowego odbiega nieco od zależności, jaką prezentują wyroby ceramiczne. Wynika to z odmiennej budowy bazaltu i materiałów ceramicznych. Struktura bazaltu jest zwięzła, zwarta, zaś kruszyw ceramicznych jest otwarta i porowata. Niemniej jednak skala odniesienia, jakim jest pomiar twardości, zachowuje proporcje w stosunku do wskaźnika rozkruszenia i wraz

ze wzrostem zbadanych wskaźników rośnie również twardość. Największą wartość HRC uzyskano dla ceramiki czerwonej jest ona ponad trzykrotnie większa niż twardości kruszywa bazaltowego. Wszystkie analizowane kruszywa ceramiczne wykazały większą twardość niż kruszywo bazaltowe.



Rys. 3. Zależność pomiędzy twardością HRC a wskaźnikiem rozkruszenia

Źródło: opracowanie własne

7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że istnieje zależność pomiędzy twardością wybranych kruszyw ceramicznych, a wskaźnikiem rozkruszenia (wskaźnik korelacji wynosi $R = 0,975662$ przy istotności $\alpha = 0,05$). W obrębie analizowanych kruszyw ceramicznych wyniki są zbliżone – współczynnik zmienności nie przekracza 3,7%. W odniesieniu do przebadanych materiałów ceramicznych zależności pomiędzy zbadaną twardością, a wskaźnikiem rozkruszenia jest zbliżona do funkcji liniowej. Przedstawiona metoda badań kruszyw może służyć sprawnej kontroli, jakości utylizowanego materiału ceramicznego. Dzięki dostępnym na rynku urządzeniom przenośnym do pomiaru twardości Rockwella, metoda ta może być wykorzystywana w badaniach polowych, służących utylizacji kruszyw ceramicznych poprzez ich zastosowanie w mieszankach betonowych.

Literatura

- [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, 23, pp. 1292–1297.
- [4] Khalaf F.M., DeVenny A.S., Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review, *J Mater CivEng* 2004, 16 (4), pp. 331–340.
- [5] Khaloo A.R., Properties of concrete using crushed clinker bricks as coarse aggregate, *ACI Mater J* 1994, 91 (2), pp. 401–407.
- [6] Khatib J.M., Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, *CemConcr Res* 2005, 35 (4), pp. 763–769.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Senthamarai R.M., Devadas Manoharan P., Concrete with ceramic waste aggregate, *Cement Concr Compos* 2005, 27, pp. 910–913.
- [10] Lopez, B. Llamas, A. Juan, J.M. Moran, I. Guerra Eco-efficient concretes: impact of use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete, *Biosyst Eng* 2007, 96 (4), pp. 559–564.
- [11] Halicka A., Ogrodnik P., Zegardło B., Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate *Constr Build Mater* 2013, 48, pp. 295–305.
- [12] 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. *Constr Build Mater* 2006, 122, pp. 736–742,
- [13] PN-EN 933-1:2012. Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.
- [14] PN-EN 12620:2002. Kruszywa do betonu.
- [15] PN-EN 1097-6: 2013. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 6: Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości.

- [16] PN-EN 1097-7:2008. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza. Metoda piknometryczna.
- [17] PN-B-06714-40:1978. Kruszywa mineralne – Badania. Oznaczanie wytrzymałości na miażdżenie.
- [18] PN-EN ISO 6508-1:2015-04. Metale. Pomiar twardości sposobem Rockwella. Część 1: Metoda badań.
- [19] Ashby M.F., Jones D.R.H., Materiały inżynierskie, WNT Warszawa 1996.
- [20] Jamróży Z. Technologia betonu, PWN, Warszawa 2006.
- [21] Kleinrok D., Kordek M., Technologia ceramiki cz. 3, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1978.