

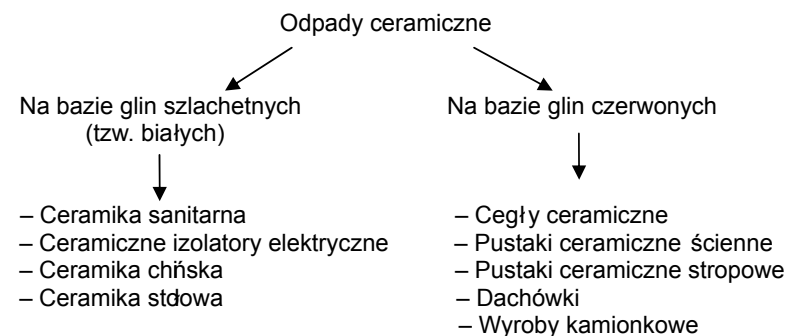
# Właściwości betonu z kruszywem uzyskanym z odpadów ceramiki sanitarnej

Mgr inż. Bartosz Zegardło, Collegium Mazovia Innowacyjna Szkoła Wyższa,  
dr hab. inż. Anna Halicka, Politechnika Lubelska

## 1. Wprowadzenie

Jednym z naturalnych kierunków utylizacji odpadów nieorganicznych jest wykorzystanie ich do wytworzenia nowych materiałów budowlanych, w szczególności zastosowania ich jako składnika betonów. Użycie takich odpadów jako kruszywa do betonów prowadzi do projektowania ekologicznych tzw. „zielonych betonów” (*green concrete*). Wpływa to w sposób podwójnie korzystny na środowisko: zmniejsza ilość deponowanych odpadów oraz obniża wydobycie kruszyw ze złóż naturalnych. Poszukiwanie alternatywnych kruszyw, bazujących na odpadach przemysłowych jest więc nie tylko zgodne z trendami ekonomii, ale również jest uzasadnione ekologicznie.

Odpady produkcyjne przemysłu ceramicznego stanowią w Europie od 3 do 7% produkcji, co oznacza, że na wysypiskach pojawiają się rocznie miliony ton wypalanych glin [1]. Mają one w aspekcie recyklingu tę zaletę, że wykorzystywane jako kruszywo nie muszą być w sposób szczególny przetwarzane. Również proces technologiczny wytworzenia mieszanki betonowej nie wymaga żadnych zmian w stosunku do betonów z kruszywem tradycyjnym. Odpady ceramiczne podzielić można na dwie grupy ze względu na surowce, z jakich powstały (rys.1). Odpady pierwszej grupy powstają w zakładach, które wytwarzają wyroby z wypalanych glin czerwonych, takie jak cegły, pustaki ceramiczne czy dachówki. Druga grupa to odpady produkcyjne w zakładach wytwarzających wyroby na bazie glin szlachet-



Rys. 1. Klasyfikacja odpadów ceramicznych

nych tzw. białych. Do nich zalicza się ceramikę sanitarną, izolatory, ceramikę stołową, chińską itp. Ze względu na zróżnicowane surowce, z których wytwarzane są produkty ceramiczne, mają one zróżnicowane składy chemiczne (tab. 1), a w związku z tym różne właściwości zarówno fizyczne, jak i chemiczne. O ile zagadnienie wykorzystania odpadów ceramiki czerwonej jako alternatywnego kruszywa do betonów jest zagadnieniem dość znanym, o tyle badania betonu z kruszywem z odpa-

dów ceramiki szlachetnej relacjonowane są w nielicznych publikacjach obcojęzycznych [1, 2, 3, 4]. Badania betonów z dodatkiem kruszyw z ceramiki czerwonej wskazują na niższe ich parametry wytrzymałościowe w porównaniu z betonami na kruszywach tradycyjnych (np. w badaniach [4] uzyskano wytrzymałości na ściskanie niższe o około 40%, a wytrzymałości na rozciąganie niższe o 26%). Badane w pracy [1] betony, w których część kruszywa zastąpiono kruszywem wytwor-

Tabela 1. Składy chemiczne przykładowych odpadów ceramicznych [1]

Rodzaj ceramiki	Zawartość związków (%)							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Ceramika z czerwonych glin dwukrotnie wypalanych	51,7	18,2	6,1	6,1	2,4	0,2	4,6	0,8
Ceramika z białych glin jednokrotnie wypalanych	58,0	18,0	1,0	8,3	0,6	0,2	1,2	0,8
Ceramika z białych glin dwukrotnie wypalanych	59,8	18,6	1,7	5,5	3,5	1,6	2,5	0,4
Płytki grysowe z glin czerwonych	29,1	20,3	7,7	1,2	1,1	0,4	4,2	0,9
Płytki grysowe 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

Tabela 2. Właściwości niektórych odmian mas ceramicznych używanych do produkcji ceramiki sanitarnej [4]

Właściwości	Rodzaj masy				
	masa fajansowa	masa półporcelanowa	porcelana	vitreous-China	
	Sposób odlewania				
	stendowe	stendowe	na przenośniku	na przenośniku	na przenośniku
Temperatura wypalania [°C]	1280–1200	1185–1250	1185–1250	1250–1280	1210–1230
Nasiąkliwość [%]	6,0–10,0	do 5,0	do 5,0	do 5,0	0,75
Wytrzymałość na ściskanie próbek szklawionych [MPa]	60,0–90,0	130,0–250,0	130,0–250,0	400,0–500,0	400,0–600,0
Wytrzymałość na uderzenie [kg/cm <sup>2</sup> ]	1,3–2,0	1,8–2,1	1,8–2,1	1,0–2,0	1,5–2,2
Moduł sprężystości [GPa]	22,0–25,0	30,0–40,0	30,0–40,0	60,0–80,0	40,0–70,0
Współczynnik rozszerzalności cieplnej [α·10 <sup>6</sup> ]	6,0–8,5	4,0–5,0	4,0–5,0	4,0–6,5	6,0–7,0

ronym przez przekruszenie ceramiki sanitarnej, wskazywały na wzrost parametrów wytrzymałościowych o około 10%. Praca [2] relacjonuje badania betonów, w których całe kruszywo tradycyjne zostało zastąpione kruszywem ze zmieszanych izolatorów elektrycznych. Badane betony, przy różnych stosunkach w : c, nie wykazywały różnic w parametrach wytrzymałościowych w porównaniu z wysokowartościowymi betonami sporządzonymi na kruszywie kamiennym przy tych samych wskaźnikach w : c. Autorzy pracy [3] zastępując frakcje tradycyjnego kruszywa grubego przekruszoną ceramiką sanitarną, otrzymali betony o wytrzymałościach zbliżonych

do wytrzymałości betonów na kruszywie tradycyjnym.

## 2. Właściwości odpadów ceramiki sanitarnej

Głównymi produktami przemysłu ceramiki sanitarnej są: umywalki, słupki do montażu umywalk, muszle klozetowe i zbiorniki do muszli. Pozostałe wyroby, stanowiące 10–15% produkcji, to medyczne instalacje sanitarne, muszle laboratoryjne, pisuary, bidety, zbiorniki, wanny oraz wbudowywane detale, takie jak: haki do wieszaków, mydelnice, wsporniki do półek, uchwyty do szczotek, podstawki pod szklanki itp. [5]. Wymienia się dwa zasadnicze źródła

powstawania odpadów ceramiki sanitarnej. Pierwsze to odpady poprodukcyjne – wysoko postawione wymogi kontroli jakości kwalifikują szereg wyrobów jako odpad poprodukcyjny. Najczęstszymi wadami są pęknięcia, szczyrby, uszkodzenia szklawa itp. Drugie – to zwyczajowa wymiana przez użytkowników wyrobów na nowe, co podyktowane jest względami estetycznymi. Podstawowym składnikiem wszystkich mas ceramicznych, używanych do wytworzenia wyrobów ceramiki sanitarnej jest kaolin, zaliczany do białych glin szlachetnych. Różnorodność składników mas ceramicznych oraz zróżnicowane procesy produkcyjne i parametry technologiczne,

Tabela 3. Cechy kruszywa ceramicznego na tle cech kruszyw tradycyjnych [5, 6, 7]

Lp.	Właściwość	Jednostka	Granit	Bazalt	Piaskowiec kwarcytowy	Wapień zbity	Dolomit	Kruszywo z ceramiki [5]	Kruszywo z ceramiki badania własne [6]
1	Gęstość właściwa	kg/dm <sup>3</sup>	2,3–2,8	2,6–3,2	2,6–2,7	2,6–2,9	2,4–2,8		2,64
2	Gęstość objętościowa	kg/dm <sup>3</sup>	2,1–2,7	2,5–3,1	2,4–2,6	2,5–2,8	2,2–2,6		2,36
3	Wytrzymałość na ściskanie	MPa	160–240	250–400	120–200	80–180	60–180	400–600	
4	Wytrzymałość na rozłupanie	MPa	7,0–14,0	10,0–20,0	7,0–11,0	4,0–10,0	4,0–10,0		
5	Moduł sprężystości	GPa	13,0–61,0	56,0–99,0	40,0–43,0	21,0–53,0	18,0–48,0	40,0–70,0	
6	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	m/C	0,5–0,9	0,8–1,2	1,2–1,8	0,1–0,8	0,3–1,2	0,6–0,7	
7	Nasiąkliwość	%	0,2–0,5	0,1–0,4	0,2–0,5	0,3–1,5	0,3–2	0,75–5	1,53
8	Porowatość	%	do 1,0	do 3,0	do 5,0	do 3,0	do 4,0		
9	Ścieralność	cm	0,1–0,3	0,1–0,2	0,3–1,5	0,2–2,0	0,3–1,4		
10	Odporność ogniowa		dostateczna	b.dobra	dostateczna	dobra do 800°C	dobra do 800°C	b. dobra	
11	Odczyn chemiczny		kwaśny	zasadowy	zasadowy	zasadowy	zasadowy		

jak np. temperatura wypalania, wpływają na znaczne różnice we właściwościach zarówno chemicznych jak i fizycznych otrzymywanego materiału, a co za tym idzie – właściwościach otrzymywanych wyrobów (tab. 2).

Zasadnicza większość wykonywanych obecnie wyrobów ceramiki sanitarnej technicznej powstaje z mas tzw. *Vitrious-China*. Wysoka wytrzymałość oraz inne cechy fizyczne tego materiału pozwalają przewidywać, że użycie go jako kruszywa do betonu będzie korzystne.

Kruszywo zastosowane w badaniach własnych zostało przygotowane na bazie poprodukcyjnych odpadów ceramicznych przez rozdrobnienie za pomocą kruszarek szczękowych. Podczas procesu kruszenia wyodrębniono frakcję drobną od 0 do 4 mm oraz frakcję grubą od 4 do 8 mm. Kruszywo grubsze powyżej 8 mm trafiało powtórnie do kruszarki. Szczegółowe badania tak powstałego kruszywa zrelacjonowano w [6].

W tabeli 3 zestawiono na podstawie danych literaturowych i badań własnych, właściwości odpadów ceramicznych na tle tradycyjnych kruszyw używanych do betonów. Na jej podstawie można stwierdzić, że kruszywo przygotowane z ceramiki sanitarnej charakteryzuje się zbliżonymi parametrami do kruszyw tradycyjnych. Jedyną cechą wyróżniającą dane kruszywo jest stosunkowo duża nasiąkliwość (w badaniach własnych uzyskano 1,53%).

### 3. Badania wytrzymałości betonu sporządzonego na bazie kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej

Składy mieszanek betonowych zaprojektowano metodą obliczeniowo-doświadczalną. Optymalizowano: – proporcje ilości poszczególnych frakcji kruszywa, aby stos okruszowy był jak najbardziej szczelny, – ilość zaczynu, aby uzyskać mieszanke urabialną i szczelny beton (ze względu na dużą nasiąkliwość kruszywa pierwsze próbné beto-

**Tabela 4.** Wyniki własnych badań wytrzymałościowych betonu na bazie kruszywa ceramicznego

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

ny charakteryzowały się porowatością w górnych częściach formowanych próbek).

Ostatecznie ustalono następujące proporcje składników: kruszywo  $K = 1387,9 \text{ kg/m}^3$  (w tym kruszywo frakcji  $0 \div 4 \text{ mm} - 991,37 \text{ kg/m}^3$ , kruszywo frakcji  $4 \div 8 \text{ mm} - 396,55 \text{ kg/m}^3$ ); woda  $W = 201,4 \text{ kg/m}^3$ ; cement  $C = 493,4 \text{ kg/m}^3$ .

Bazując na tak dobranych proporcjach składników, przygotowano mieszanki betonowe na dwóch rodzajach cementów: cemencie portlandzkim CEM I 42,5R oraz glinowym o zawartości 70%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Przygotowanie próbek na bazie cementu glinowego było podyktowane planowanymi badaniami odporności kruszywa ceramicznego na wysokie temperatury, szczegółowo zrelacjonowanymi w [8]. Dla porównania wyników wykonano próbki z tradycyjnym kruszywem żwirowym o tych samych proporcjach składników.

Badania wytrzymałości przeprowadzono na próbkach o wymiarach  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ , najpierw poddając je zginaniu trójpunktowemu, następnie otrzymane połówki próbek poddano ścisaniu. Wyniki badań wytrzymałościowych zastawiono w tabeli 4.

Badania potwierdziły przydatność kruszywa wytworzonego z odpadów ceramiki sanitarnej jako kruszywa do betonu.

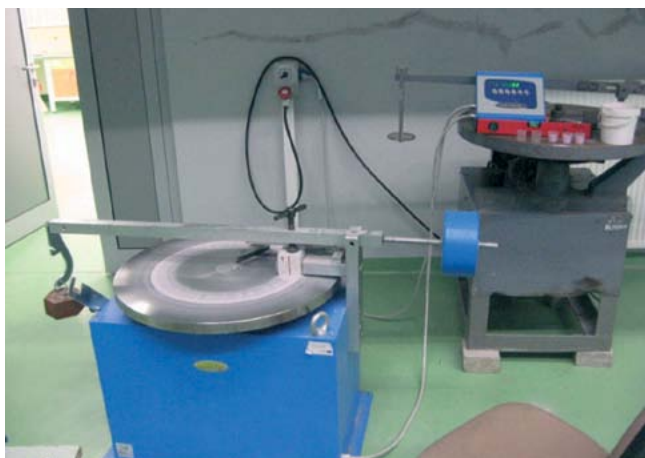
Wykazały nawet wyższe wytrzymałości na ściskanie i na rozciąganie (o około 10%) betonu na kruszywem ceramicznym w porównaniu z betonem na kruszywem żwirowym. Korzystne wyniki można tłumaczyć tym, że kruszywo ceramiczne jest kruszywem łamanym o zróżnicowanej granulacji, dzięki czemu stos okruszowy jest szczelny, drobiny frakcji mniejszych układają się ściśle pomiędzy ziarnami kruszywa grubszego, natomiast dzięki ostrym krawędziom kruszywa, ziarna klinują się pomiędzy sobą.

### 4. Badania ścieralności betonu sporządzonego na bazie kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej

Badanie ścieralności betonu sporządzonego na bazie odpadów ceramiki sanitarnej wykonano w Laboratorium Budownictwa Politechniki Lubelskiej na tarczy Bohemego, na podstawie normy [8]. Stanowisko badawcze (fot.1) wyposażono w tarczę Bohemego z elektronicznym miernikiem obrotów, płytkę do układania ścierniwa, szczotkę do cyklicznego czyszczenia tarczy, miarkę elektroniczną, wagę laboratoryjną oraz miarki do wydzielania porcji ścierniwa. Jako ścierniwo użyto proszek korundowy. Badaniom poddano beton na ce-

**Tabela 5.** Wyniki własnych badań ścieralności betonów na kruszywem ceramicznym

Próbki na kruszywem żwirowym												
Nr próbki	Próbka nr 1				Próbka nr 2				Próbka nr 3			
Wymiary początkowe próbki przed badaniem	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$
	72,23	71,71	71,8	72,27	71,24	71,0	71,22	71,37	72,32	72,3	72,25	72,24
Wymiary końcowe próbki po badaniu [mm]	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$
	69,53	69,4	69,63	69,73	68,26	68,34	68,5	68,4	70,21	69,9	69,32	69,36
Różnice wysokości ścieńków próbki [mm]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
	2,7	2,31	2,17	2,54	2,98	2,66	2,72	2,97	2,11	2,39	2,93	2,88
Ścieralność na podstawie straty wysokości $S = (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) / 4$	S = 2,43 mm				S = 2,833 mm				S = 2,58 mm			
Średnia ścieralność próbek na podstawie straty wysokości – 2,61 mm												
Masa próbki przed badaniem	$m_1 = 880,3 \text{ g}$				$m_1 = 822,9 \text{ g}$				$m_1 = 860,0 \text{ g}$			
Masa próbki po badaniu	$m_2 = 849,9 \text{ g}$				$m_2 = 791,7 \text{ g}$				$m_2 = 829,0 \text{ g}$			
F – powierzchnia ścierania	$72,48 \times 73,23 = 5307,71 \text{ mm}^2$				$70,58 \times 70,97 = 5009,06 \text{ mm}^2$				$71,65 \times 71,91 = 5152,4 \text{ mm}^2$			
M – strata masy	30,35 g				31,26 g				30,84 g			
G – gęstość pozorna	0,002303 g/mm <sup>3</sup>				0,00231 g/mm <sup>3</sup>				0,0023 g/mm <sup>3</sup>			
Ścieralność na podstawie straty masy $S = (M/F) \cdot (1/G)$	S = 2,48 mm				S = 2,70 mm				S = 2,59 mm			
Średnia ścieralność próbek na podstawie straty wysokości – 2,59 mm												
Próbki na kruszywem ceramicznym												
Nr próbki	Próbka nr 4				Próbka nr 5				Próbka nr 6			
Wymiary początkowe próbki przed badaniem	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$
	73,36	73,41	73,14	73	73,96	74,29	74,66	74,38	71,72	71,4	71,52	71,78
Wymiary końcowe próbki po badaniu [mm]	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$
	71,19	71,43	71,15	70,99	71,82	72,25	72,69	72,2	69,43	69,6	70	69,8
Różnice wysokości ścieńków próbki (mm)	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
	2,17	1,98	1,99	2,01	2,14	2,04	1,97	2,18	2,29	1,82	1,52	1,98
Ścieralność na podstawie straty wysokości $S = (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) / 4$	S = 2,04 mm				S = 2,08 mm				S = 1,90 mm			
Średnia ścieralność próbek na podstawie straty wysokości – 2,01 mm												
Masa próbki przed badaniem	$m_1 = 862,41 \text{ g}$				$m_1 = 851,9 \text{ g}$				$m_1 = 822 \text{ g}$			
Masa próbki po badaniu	$m_2 = 836,43 \text{ g}$				$m_2 = 826,4 \text{ g}$				$m_2 = 800 \text{ g}$			
F – powierzchnia ścierania	$74,7 \times 73,68 = 5503,896 \text{ mm}^2$				$74,35 \times 73,42 = 5458,78 \text{ mm}^2$				$75,13 \times 71,04 = 5337,2 \text{ mm}^2$			
M – strata masy	25,98 g				25,42 g				21,67 g			
G – gęstość pozorna	0,00214 g/mm <sup>3</sup>				0,0021 g/mm <sup>3</sup>				0,0021 g/mm <sup>3</sup>			
Ścieralność na podstawie straty masy $S = (M/F) \cdot (1/G)$	S = 2,21 mm				S = 2,22 mm				S = 1,89 mm			
Średnia ścieralność próbek na podstawie straty masy – 2,10 mm												



Fot. 1. Stanowisko do badania ścieralności betonu



Fot. 2. Próbkę przed badaniem ścieralności – próbki z betonu na kruszywie ceramicznym (numer 4÷6) oraz próbki na kruszywie żwirowym (numer 1÷3)

mencie portlandzkim i kruszywie ceramicznym o proporcjach składników podanych w p. 3. Dla celów porównawczych zbadano także beton na kruszywie żwirowym o tych samych proporcjach.

Próbki betonowe zaformowano w formie prostopadłościanów o wymiarach 90 x 90 x 100 mm. Po dwóch dniach od zaformowania, próbki zostały wyjęte z form, po czym zostały poddane pielęgnacji wilgotnościowej przez kolejne 30 dni. Z tak przygotowanych próbek na tydzień przed badaniem wycięto za pomocą piły tarczowej foremne kostki o wymiarach około 72 x 72 x 72 mm. Przed samym badaniem próbki oznakowano (próbki z kruszywem żwirowym – nr 1, 2, 3, a próbki z kruszywem ceramicznym nr 4, 5, 6), zważono oraz poddano dokładnym pomiarom za pomocą miarki elektronicznej. Oznakowane przed badaniem próbki przedstawiono na fotografii 2.

Próbki ułożono na tarczy z rozsypnym proszkiem korundowym poddano ścieraniu przez obrót tarczy. Każda z próbek została poddana 440 obrotom tarczy, przy czym po każdym 110 obrotach próbkę obracano zmieniając kierunek ścierania. Podczas obrotu wymieniano ścierniwo. Próbki po badaniu poddano pomiarom i ważeniu w ten sam sposób jak wykonano to podczas przygotowań.

Ścieralność określono na podstawie średniej utraty wysokości bezpośredniej oraz średniej utraty wy-

sokości obliczonej na podstawie straty masy. Wyniki przedstawiono w tabeli 5. Średnia ścieralność mierzona w sposób bezpośredni dla próbek na kruszywie żwirowym wynosiła 2,63 mm, a na kruszywie ceramicznym 2,01 mm. Podobne wyniki otrzymano w obliczeniach straty wysokości przez ubytek masy. Dla próbek na kruszywie żwirowym wynosiła ona 2,59 mm, a na kruszywie ceramicznym 2,10 mm. Oznacza to, że próbki na kruszywie ceramicznym charakteryzowały się niższą ścieralnością o około 18%. Według [7] beton można uznać za odporny na ścieranie, gdy podczas badania na tarczy Boehemego ubytek wysokości próbki na skutek ścierania powierzchni nie przekroczy 25 mm, jeśli zastosowaniem betonu miałyby być nawierzchnia podana ciężkiemu ruchowi pojazdów, i 30 mm – dla przewidywanego ruchu średniego. Obydwa badane betony zakwalifikować można do betonów odpornych na ścieranie, przy czym beton na kruszywie tradycyjnym jest odporny na ścieranie odpowiadające ruchowi średniemu, natomiast beton na kruszywie ceramicznym jest odporny na ścieranie nawet w przypadku ruchu ciężkiego.

## 5. Wnioski

Wyniki badania odporności betonu na ścieranie betonu sporządzonego na bazie kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej wykazały ście-

ralność niższą o około 20% w porównaniu do betonu sporządzonego na bazie kruszywa żwirowego. Beton taki można zatem rekomendować do zastosowań w których wymagana jest wysoka odporność betonu na ścieranie.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Pacheco-Torgal F., Jalali S., Reusing ceramic wastes in concrete, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 832–838
- [2] Senthamarai RM, Devadas Manoharan P, Gobinath D., Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 2413–2419
- [3] Guerra I., Vivar I., Llamas B., Juan A. Moran J., Eco-efficient concretes: The effect of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete, *Waste management* 29 (2009) 643–646
- [4] De Brito J., Pereira A. S., Correia J. R., Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Volume: 27, Issue: 4 (2005) 429–433
- [5] Awgustinik A. J., *Ceramika*, Arkady Warszawa 1980
- [6] Halicka A., Zegardto B., Odpady ceramiki sanitarnej jako kruszywo do betonu, *Przegląd Budowlany* 7–8/2011
- [7] Jamroży Z., „Beton i jego technologie” Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006
- [8] Ogródnik P., Zegardto B., Halicka A., Wstępna analiza możliwości zastosowania odpadów ceramiki sanitarnej w funkcji kruszywa do betonów pracujących w warunkach wysokich temperatur, *Bezpieczeństwo i technika pożarowa*, 1/2012
- [9] PN-EN 14157:2005 – Oznaczanie odporności na ścieranie