
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 31
(październik–grudzień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

Rok X

Warszawa–Opole 2017

*TOMASZ BARAN**
*PIOTR FRANCUZ***
*ANNA SKAWIŃSKA****
*ALEKSANDRA TKOCZ*****

Kształtowanie właściwości cementów żuźlowych z dodatkiem granulowanego żuźla wielkopieczowego o różnej zawartości fazy szklistej

Słowa kluczowe: cement, granulowany żużel wielkopieczowy, faza szklista, wytrzymałość na ściskanie.

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości cementów żuźlowych wykonanych z granulowanego żuźla wielkopieczowego o różnej zawartości fazy szklistej. Program badań obejmował próbki żuźla o wyraźnie zróżnicowanej zawartości fazy szklistej od 58 do 99% masy. Przygotowano cementy CEM II/A-S, CEM II/B-S i hutniczy CEM III/A, zawierające odpowiednio 15, 30 i 60% masy żuźla. Badano podstawowe właściwości cementów, będące przedmiotem wymagań i oceny zgodności norm PN-EN 197-1 i PN-EN 15167-1.

Na podstawie uzyskanych wyników badań potwierdzono, że największy wpływ na aktywność hydrauliczną żuźla ma zawartość fazy szklistej. Drugim ważnym parametrem oceny aktywności żuźla jest jego współczynnik aktywności ($\text{CaO} + \text{MgO}/\text{SiO}_2$). Przy tej samej zawartości fazy szklistej, im większy współczynnik aktywności, tym żużel wykazuje większą aktywność hydrauliczną. Wyniki badań cementów żuźlowych potwierdzają te zależności. Spośród badanego żuźla krajowego i zagranicznego, największe wskaźniki aktywności hydraulicznej wykazał żużel z Huty Katowice i Huty Sendzimir, a

* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, t.baran@icimb.pl

** Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, p.francuz@icimb.pl

*** Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, a.skawinska@icimb.pl

**** Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, o.bochek@icimb.pl

zawierający odpowiednio 99 i 88% fazy szklistej; miały one zdecydowanie lepsze właściwości w porównaniu do żużła sprowadzanego w ostatnich latach w dużych ilościach z importu.

1. Wstęp

Celem przedstawionych w artykule badań jest ocena możliwości wykorzystania żużła wielkopieczowego o różnej zawartości fazy szklistej w technologii produkcji cementów powszechnego użytku według normy PN-EN 197-1 [1] i cementów specjalnych według normy PN-B-19707 [2]. Zakres analizy dotyczy znanych w chemii cementu zależności aktywności hydraulicznej żużła od zawartości fazy szklistej oraz udział podstawowych tlenków: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO i MgO , decydujących o jego aktywności w procesach hydratacji i twardnienia cementów z dodatkiem żużła. Wymienione normy cementowe podają wymagania określające przydatność granulowanego żużła wielkopieczowego jako składnika hydraulicznego cementów [1–2]. Minimalna zawartość fazy szklistej w żużlu powinna wynosić 2/3 masy żużła, suma tlenków: SiO_2 , CaO i MgO powinna stanowić co najmniej 2/3 masy, pozostałość powinien stanowić Al_2O_3 z niewielkimi ilościami innych związków, a stosunek tlenków ($\text{CaO} + \text{MgO}/\text{SiO}_2$), określany jako współczynnik aktywności, winien wynosić nie mniej niż 1,0 [3]. Takie same wymagania dla mielonego granulowanego żużła wielkopieczowego, jako dodatku aktywnego typu II do betonu, w zakresie zawartości fazy szklistej oraz udziału podstawowych tlenków, stawia norma PN-EN 15167-1 [4]. Norma ta uwzględnia również bezpośrednią metodę oceny właściwości hydraulicznych żużli w oparciu o jego wskaźnik aktywności, wyrażony jako stosunek wytrzymałości ścisiskowej przy wykonanej z mieszanki 50% masy mielonego żużla i 50% masy cementu porównawczego do wytrzymałości przy porównawczej, wykonanej z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 lub CEM I 52,5 [4].

Przemysł cementowy w Polsce wykorzystuje w technologii produkcji cementów duże ilości granulowanego żużla wielkopieczowego. Stosowany był żużel z krakowskich hut żelaznych: Hut. Sendzimir, Hut. Katowice, Hut. Szczecin, Hut. Częstochowa. W latach siedemdziesiątych, gdy produkcja cementu przekroczyła 20 mln ton, cementy żużlowe stanowiły ponad 80% produkcji, a zużycie żużla wynosiło blisko 4 mln ton rocznie. Z uwagi na jakość stosowanych rud żelaznych, żużel z tego okresu miał niski współczynnik aktywności ($\text{CaO} + \text{MgO}/\text{SiO}_2$) o wartości ok. 1,0 oraz różnicowaną zawartość fazy szklistej od 75% w hutach Szczecin i Częstochowa, 85–90% w Hucie Sendzimir, do 98% w Hucie Katowice, wykorzystującej nowoczesne systemy szybkiego chłodzenia stopu żużlowego [5–6]. W obecnych warunkach w Polsce są eksploatowane jedynie dwie ostanie z wymienionych hut. Zmiany jakości rudy spowodowały znaczny wzrost współczynnika aktywności, który osiągnął wartość ok. 1,4, co dla porównawczej zawartości fazy szklistej powoduje znaczną poprawę właściwo-

ści hydraulicznych żużła. Granulowany żużel wielkopiecowy z hut Sendzimira i Katowice wykorzystywany jest do produkcji cementów powszechnego użytku i specjalnych, w tym cementów o dużej wytrzymałości, nawet klasy 52,5 w przypadku cementów portlandzkich żużlowych CEM II/A-S i CEM II/B-S. Do ich produkcji wykorzystuje się w ostatnich latach 1,5–1,7 mln ton żużła.

Rozwój produkcji cementów żużlowych odgrywa ważną rolę w zmniejszeniu przez przemysł cementowy emisji CO₂, poprzez zmniejszenie zawartości klinieru w cemencie [7]. Możliwości zwiększenia produkcji cementów żużlowych są ograniczone z uwagi na brak dobrej jakości żużła. Baza żużła krajowego została drastycznie ograniczona z uwagi na wielkość produkcji surówki w hutach. Deficyt żużła w ofercie handlowej dla przemysłu cementowego pogłębiało w ostatnich latach wyłączenie w Hucie Sendzimira linii granulowania żużła, uruchomionej ponownie w 2013 r. W coraz większym stopniu zakłady cementowe w Polsce wykorzystują żużel sprowadzany z zagranicy, z następujących krajów: Węgry, Rosja, Czechy, Słowacja, Ukraina, Finlandia. Do zakładów cementowych trafia żużel o dużym zróżnicowaniu składu chemicznego i zawartości fazy szklistej. Oferty dostaw dotyczą żużła o zróżnicowanej aktywności hydraulicznej. Należy zakładać więc zróżnicowanie możliwości ich efektywnego wykorzystania w procesie produkcji cementów. Zagadnienie to jest głównym przedmiotem artykułu. Przedstawiono wyniki badań właściwości cementów żużlowych wyprodukowanych z granulowanego żużła wielkopiecowego, sprowadzanego z różnych krajów. Analizę wyników odniesiono do „referencyjnego” żużła krajowego z hut Sendzimira i Katowice.

Badania potwierdzają znane zależności kształtowania aktywności hydraulicznej żużła granulowanego poprzez zawartość fazy szklistej oraz współczynnik aktywności. Dane przedstawione w artykule, odniesione do warunków praktycznych produkcji cementów żużlowych, dowodzą, że trudno przecenić znaczenie właściwości żużła na kształtowanie cech użytkowych cementów żużlowych oraz efektywności procesów ich produkcji.

2. Zakres badań

Przedstawiony w artykule zakres badań uwzględnia dwa podstawowe zagadnienia:

– ocenę właściwości hydraulicznych żużła o różnej zawartości fazy szklistej. Przedmiotem badań był, jak podkreślono we wprowadzeniu, żużel z importu, o zróżnicowanej zawartości fazy szklistej i składzie chemicznym. Jako referencyjne badano żużel krajowy z hut Katowice i Sendzimira. Przedmiotem analizy były podstawowe cechy granulowanego żużła wielkopiecowego jako składnika cementu i aktywnego dodatku typu II do betonu;

– badania powierzchni właściwej oraz wytrzymałość na zginanie i ściskanie cementów żużlowych po 2, 7, 28 i 90 dniach twardnienia.

3. Materiały zastosowane do badań

Żużel

Do badań wytypowano 7 próbek granulowanego żużla wielkopieczowego różniącego się składem chemicznym oraz zawartością fazy szklistej. Żużel oznaczony od A do E pochodził z importu. Żużel referencyjny stanowił żużel z hut Katowice i Sendzimira. Skład chemiczny żużla oraz zawartość fazy szklistej zestawiono w tabeli 1. Dyfraktogramy żużla o skrajnych zawartościach fazy szklistej zamieszczono na rycinach 1 i 2. Zawartość fazy szklistej oznaczono metodą mikroskopii optycznej według załącznika C do normy PN-B-19707.

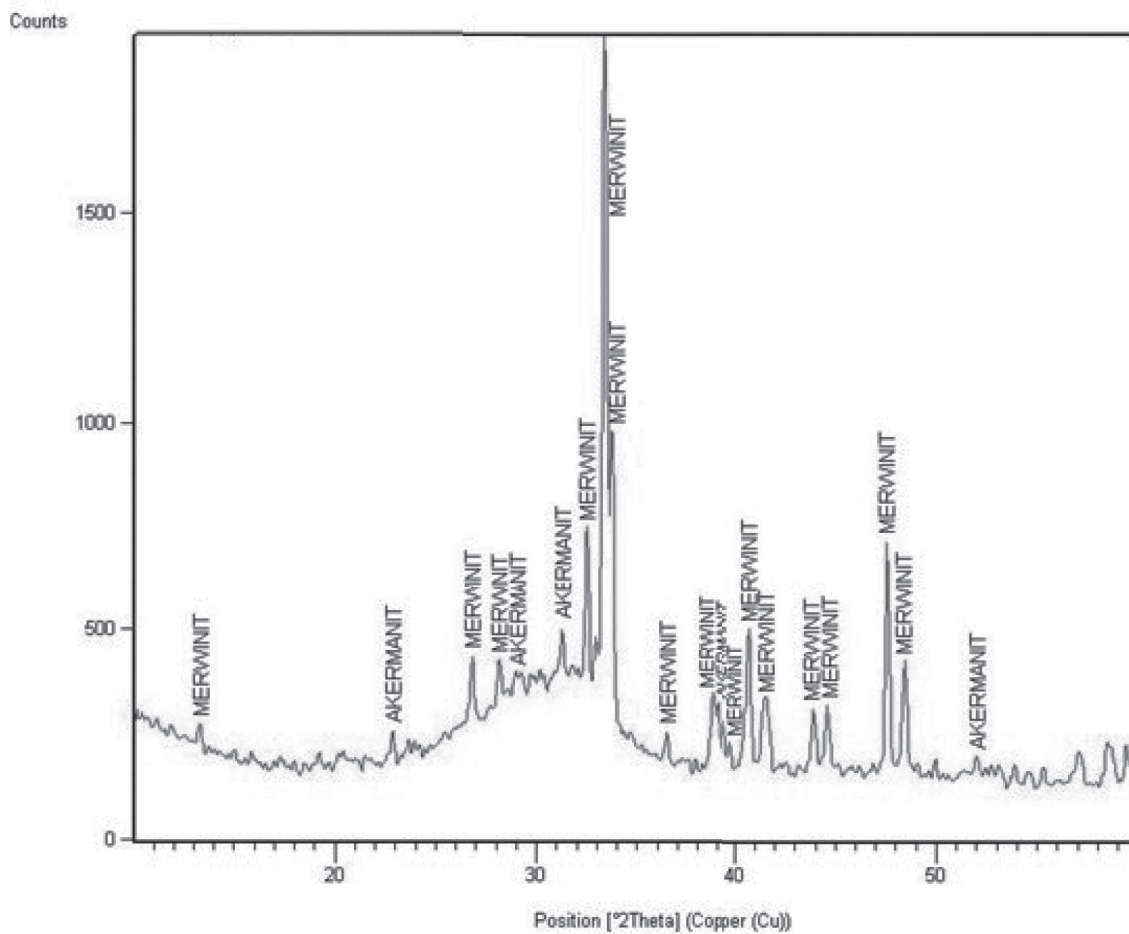
Tabela 1

Składy chemiczne i zawartość fazy szklistej w żużlu

Składnik	Żużel A	Żużel B	Żużel C	Żużel D	Żużel E	Żużel z Huty Katowice	Żużel z Huty Sendzimira
	udział składnika [% masy]						
LOI	+1,45	+0,84	+0,77	+0,78	+0,29	+0,81	+1,53
SiO ₂	34,65	38,37	39,84	40,82	40,91	39,66	38,72
Al ₂ O ₃	10,15	7,44	6,95	6,64	7,64	6,47	7,06
Fe ₂ O ₃	0,22	0,32	0,29	0,37	0,35	0,49	0,70
CaO	38,86	36,32	37,46	41,38	37,40	42,27	43,59
MgO	10,63	14,34	12,80	7,53	10,08	8,03	5,69
SO ₃	0,12	0,12	0,09	0,10	0,10	0,08	0,09
S ²⁻	0,99	0,54	0,48	0,72	0,60	0,59	0,45
K ₂ O	0,85	0,44	0,48	0,79	0,99	0,84	0,35
Na ₂ O	0,39	0,41	0,46	0,48	0,56	0,42	0,44
Zawartość fazy szklistej [% masy]	58*	71	83	90	95	99	88
(CaO + MgO)/SiO ₂	1,43	1,32	1,26	1,20	1,16	1,27	1,27
Suma tlenków: CaO + MgO + SiO ₂	84,1	89,0	90,1	89,7	88,4	90,0	88,0

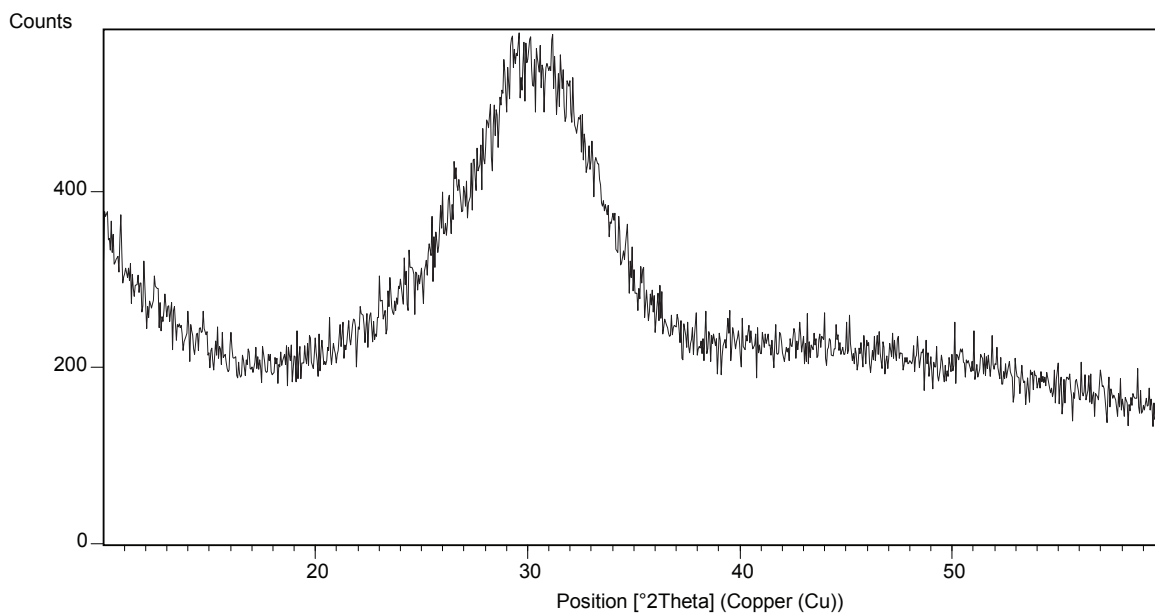
* – żużel nie spełnia wymagań minimalnej zawartości fazy szklistej, która powinna przekraczać 66,7%.

Źródło: Tab. 1–6 – opracowanie własne.



Ź r ó d ł o: Ryc. 1-4 – opracowanie własne.

Ryc. 1. Dyfraktogram żużla A zawierającego 58% fazy szklistej



Ryc. 2. Dyfraktogram żużla z Huty Katowice zawierającego 99% fazy szklistej

Cementy

W celu określenia aktywności hydraulicznej żużla oznaczono, zgodnie z normą PN-EN 15167, wytrzymałość z_{pr}w z cementów stosujących mieszankę 50% żużla i 50% cementu referencyjnego CEM I. Do przygotowania cementów użyto żużel zmielony do powierzchni ok. 4500 cm²/g. Jako cement referencyjny zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R o wytrzymałości ściskanej po upływie 2, 7, 28 i 90 dni, wynoszącej odpowiednio: 27,4 MPa, 45,2 MPa, 55,4 MPa i 59,6 MPa. Cementy do badań właściwości hydraulicznych żużla uzyskano przez uśrednienie przez 30 minut składek 50/50, w mieszalnikach rolkowym w pojemnikach plastikowych, wypełnionych korkami gumowymi.

Do badań podstawowych właściwości normowych cementów żużlowych przygotowano z badanego żużla cementy portlandzkie żużlowe CEM II/A-S i CEM II/B-S oraz cement hutniczy CEM III/A, zawierające odpowiednio 15, 30 i 60% masy żużla. Do produkcji cementów żużlowych zastosowano przemysłowych klinkier portlandzki o składzie chemicznym zmieszczonym w tabeli 2.

Tabela 2

Skład chemiczny i fazowy klinkieru portlandzkiego

Str. t. przeźni.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	N ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	CaOw
Udział składek [% masy]											
0,23	21,70	5,13	3,22	66,20	0,91	0,84	0,86	0,20	0,15	0,27	1,52
Skład fazowy: C ₃ S – 59%; C ₂ S – 17%; C ₃ A – 8%; C ₄ AF – 10%											

Wszystkie cementy wykonano przez wspólne mieszanie składek, tj. żużla, klinkieru i gipsu. Składki cementu rozdrobniono przed mieszaniem odpowiednio do powierzchni właściwej: klinkier 3600 cm²/g, żużel 4500 cm²/g i gips 4000 cm²/g. Dodatek gipsu wynosił 5% masy produkowanych cementów. Składki cementów homogenizowano przez 30 minut w mieszalnikach rolkowym w pojemnikach plastikowych, wypełnionych korkami gumowymi. Ten sposób przygotowania cementów nie powodował ich domielenia, czego potwierdzeniem są zbliżone powierzchnie cementów żużlowych z danym udziałem granulowanego żużla wielkopieczowego (tabela 4–6).

4. Wyniki badań

4.1. Ocena aktywności hydraulicznej żużla

Badania aktywności hydraulicznej żużla wykonano zgodnie z normą PN-EN 15167, oznaczając wytrzymałość z_{pr}w z cementów stosujących mieszankę 50% żużla i 50% cementu referencyjnego CEM I 42,5R. Wyniki badań wskazywały, że aktywności hydraulicznej żużla zmieszczono w tabeli 3.

Tabela 3

Wskaźniki aktywności hydraulicznej żużla

Rodzaj żużla wg tabeli 1	Zawartość fazy szklistej w żużlu [%]	Współczynnik aktywności (CaO + MgO)/ /SiO ₂	Wskaźnik aktywności hydraulicznej [%]			
			po 7 dniach		po 28 dniach	
			wynik	wymaganie wg PN-EN 15167- -1:2007	wynik	wymaganie wg PN-EN 15167- -1:2007
Żużel A	58	1,43	58,9	≥ 45 %	84,2	≥ 70 %
Żużel B	71	1,32	62,2		92,1	
Żużel C	83	1,26	65,5		95,3	
Żużel D	90	1,20	61,9		88,8	
Żużel E	95	1,16	68,4		97,2	
Żużel z Huty Katowice	99	1,27	73,5		108,4	
Żużel z Huty Sendzimira	88	1,27	66,1		98,2	

Analizując wyniki zestawione w tabeli 3 należy uwzględnić duży stopień rozdrobnienia żużla zastosowanego do badań, a więc wysoki stopień aktywacji mechanicznej żużla; metoda ta jest stosowana w produkcji spoiw żużlowych i cementów żużlowych. Z danych zamieszczonych w tabeli 3 wynika, że badany żużel spełniał wymagania wskaźników aktywności hydraulicznych, także żużel A zawierający tylko 58% fazy szklistej, tj. mniej niż wymagane 2/3 masy. Warto podkreślić korzystne wartości wskaźników aktywności hydraulicznych żużla krajowego. Wskaźnik aktywności hydraulicznej żużla z Huty Katowice przekracza 100% po 28 dniach. Taką aktywność tego żużla należy łączyć z sięgającą 100% zawartością fazy szklistej i korzystnym współczynnikiem aktywności równym 1,27. Żużel z Huty Sendzimira, o współczynniku aktywności wynoszącym również 1,27, przy zawartości fazy szklistej 88%, wykazuje niższe wskaźniki aktywności niż żużel z Huty Katowice. Taka zależność potwierdza decydujący wpływ fazy szklistej na aktywność hydrauliczną żużla. Żużel z importu, oznaczony jako A i B, przy bardzo dużych wartościach współczynników aktywności odpowiednio 1,43 i 1,32, wynikających z dużej zawartości MgO, wykazuje, w porównaniu do żużla krajowego, zdecydowanie niższą aktywność hydrauliczną, co należy wiązać z małą zawartością fazy szklistej. Dyfraktogram żużla A na rycinie 1 potwierdza, że MgO podnoszący wartość współczynnika aktywności (CaO + MgO)/SiO₂ związany jest w fazach krystalicznych orto- i pirokrzemianów wapniowo-magnezowych: merwinite, akermanite. Zdaniem

Bergta i Smolczyka, MgO występujące w fazie szklistej żużła ma korzystny wpływ na aktywność hydrauliczną żużła i wytrzymałość cementu żużlowego. Tak więc fazy krystaliczne merwinite i akermanite w żużlu granulowanym nie wpływają korzystnie na jego aktywność hydrauliczną [8–9]. Natomiast Rojak i inni korzystny wpływ MgO, występującego w fazie szklistej żużła, na jego aktywność hydrauliczną i wytrzymałość cementów żużlowych wiążą z równoczesną zawartością Al_2O_3 w żużlu [10]. Przy zawartości 5–6% MgO w żużlu powinno być 5–7% Al_2O_3 , a przy zawartości 10–12% MgO w żużlu powinno być 15–18% Al_2O_3 [10].

4.2. Wytrzymałość cementów żużlowych

Badania wytrzymałości cementów wykonano zgodnie z normą PN-EN 196-1:2006 – Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości. Powierzchnię właściwą cementów oznaczono metodą Blaine’a, zgodnie z normą PN-EN 196-6:2011 – Metody badania cementu – Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia. Wyniki oznaczeń powierzchni właściwej oraz wytrzymałości cementów żużlowych CEM II/A-S, CEM II/B-S i CEM III/A, z dodatkiem odpowiednio 15, 30 i 60% żużła, zamieszczono w tabelach 4–6. Szybkość narastania wytrzymałości, kształtowaną przez aktywność hydrauliczną żużła, przedstawiają ryciny 3 i 4.

Tabela 4

Wytrzymałość cementów CEM II/A-S

Rodzaj żużła w cemencie	Powierzchnia właściwa cementu [cm ² /g]	Wytrzymałość [MPa]							
		na ściskanie				na zginanie			
		po dniach							
		2	7	28	90	2	7	28	90
Żużel A	3700	23,9	39,9	46,2	55,2	4,9	6,8	7,1	7,9
Żużel B	3700	24,1	40,1	51,3	58,3	4,8	7,0	7,3	8,1
Żużel C	3700	24,4	40,2	50,9	59,2	4,8	6,9	7,2	8,2
Żużel D	3700	24,1	38,6	48,3	56,3	4,6	6,9	7,2	8,2
Żużel E	3700	24,8	42,3	53,4	61,2	4,9	7,0	7,3	8,3
Żużel z Huty Katowice	3700	25,2	43,1	55,6	66,4	5,1	7,2	7,6	8,5
Żużel z Huty Sendzimir	3700	24,6	42,1	53,6	61,8	4,8	7,0	7,2	8,3

Tabela 5

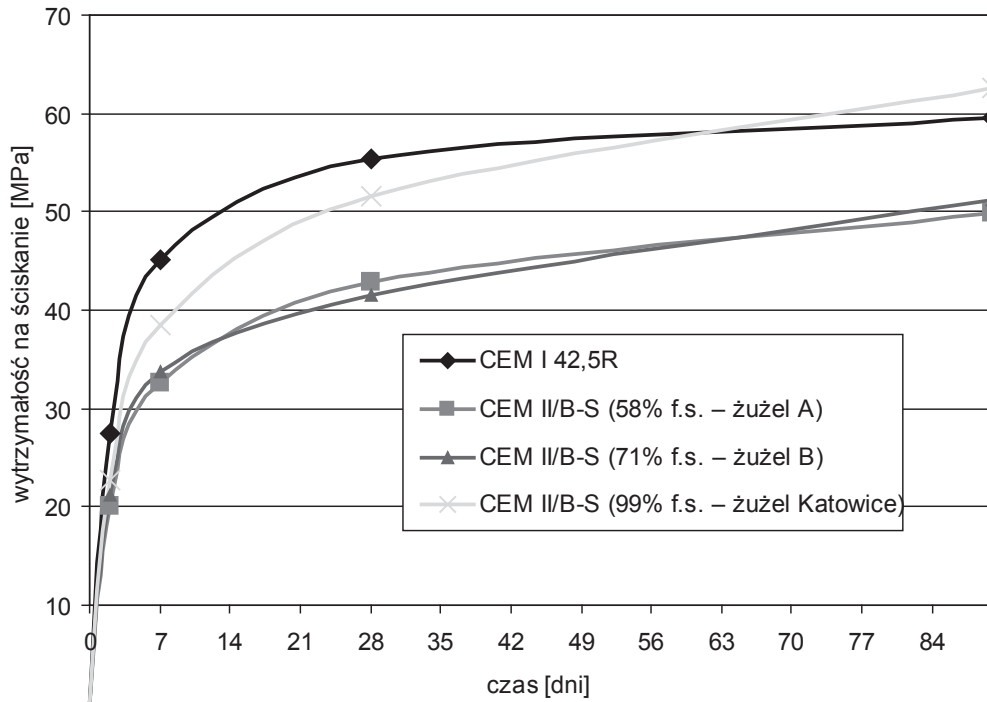
Wytrzymałość cementów CEM II/B-S

Rodzaj żuźła w cemencie	Powierzchnia właściwa cementu [cm ² /g]	Wytrzymałość [MPa]							
		na ściskanie				na zginanie			
		po dniach							
		2	7	28	90	2	7	28	90
Żuźel A	3900	20,1	32,6	42,8	49,9	4,4	6,0	6,8	7,4
Żuźel B	3900	21,2	33,8	41,6	51,2	4,3	6,0	6,8	7,5
Żuźel C	3800	20,8	34,0	45,0	54,8	4,2	5,9	7,1	7,7
Żuźel D	3800	21,4	34,1	44,8	53,2	4,4	6,1	7,0	7,9
Żuźel E	3800	22,3	36,7	48,5	60,1	4,5	6,2	7,2	8,1
Żuźel z Huty Katowice	3900	22,8	38,5	51,6	62,2	4,4	6,3	7,4	8,3
Żuźel z Huty Sendzimira	3900	22,2	36,8	48,1	60,3	4,3	6,2	7,3	8,2

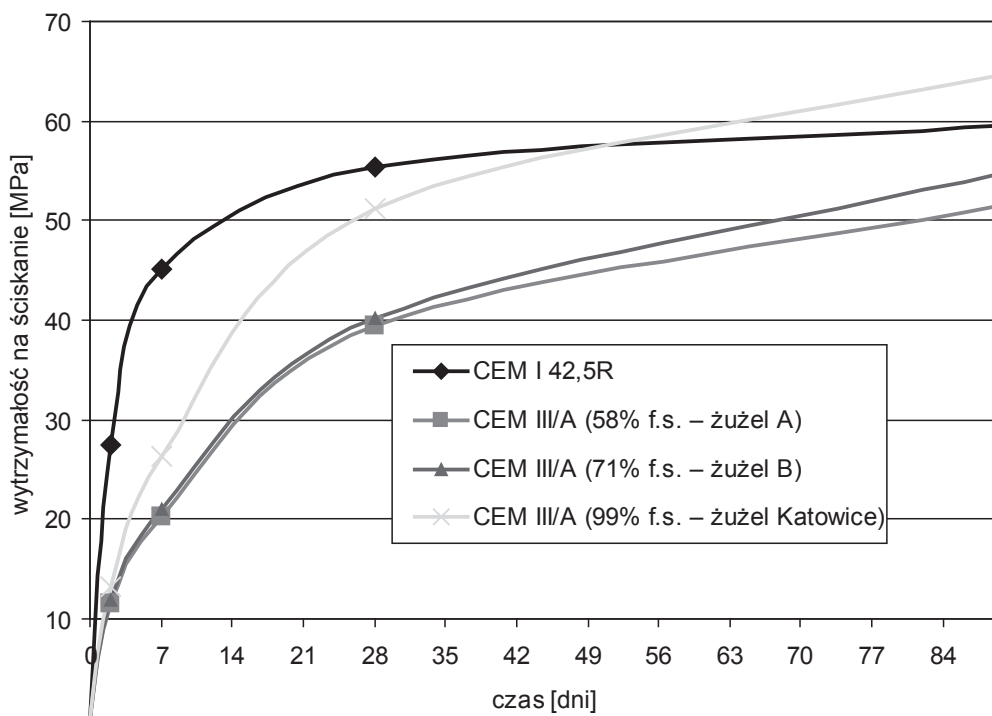
Tabela 6

Wytrzymałość cementów CEM III/A

Rodzaj żuźła w cemencie	Powierzchnia właściwa cementu cm ² /g	Wytrzymałość [MPa]							
		na ściskanie				na zginanie			
		po dniach							
		2	7	28	90	2	7	28	90
Żuźel A	4200	11,5	20,3	39,5	51,6	2,9	4,5	7,6	8,2
Żuźel B	4200	11,9	21,1	40,2	54,8	3,1	4,4	7,7	8,3
Żuźel C	4100	12,1	21,4	40,2	58,9	3,0	4,5	7,7	8,9
Żuźel D	4100	11,9	20,8	38,8	58,2	3,0	4,4	7,5	8,8
Żuźel E	4100	12,4	22,1	46,6	62,3	3,1	4,6	8,2	9,1
Żuźel z Huty Katowice	4200	13,2	24,4	51,2	64,6	3,3	4,9	8,5	9,2
Żuźel z Huty Sendzimira	4200	12,5	22,4	47,5	63,1	3,2	4,8	8,3	9,2



Ryc. 3. Krzywa wzrostu wytrzymałości cementów CEM II/B-S



Ryc. 4. Krzywa wzrostu wytrzymałości cementów CEM III/A

Zebrane w tabelach 4–6 wyniki badań wytrzymałości cementów żużlowych oraz przedstawione na rycinach 3 i 4 krzywe wzrostu wytrzymałości tych cementów potwierdzają, z jednej strony, charakterystyczny dla cementów żużlowych prze-

bieg procesów twardnienia i duże przyrosty wytrzymałości tych cementów po dłuższym okresie twardnienia. Z drugiej strony, wyniki badań cementów żużlowych potwierdzają właściwości żużła mające wpływ na dynamikę twardnienia tych cementów. Krzywe wzrostu wytrzymałości cementów CEM II/B-S i CEM III/A potwierdzają opisane wcześniej wyniki badań aktywności hydraulicznej żużła wykonane według oznaczeń normowych PN-EN 15167-1. Szybkość twardnienia cementów zawierających żużel z dużą zawartością fazy szklistej jest bardzo wysoka, w późnych okresach twardnienia. Wytrzymałość cementów CEM II/B-S i CEM III/A, zawierających odpowiednio 30 i 60% żużła, przekracza po 90 dniach twardnienia wytrzymałość cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Dotyczy to żużła krajowego oraz żużła E z importu, zawierającego 95% fazy szklistej. Żużel z importu oznaczony A i B, o szczególnie małej zawartości fazy szklistej, wykazuje zdecydowanie niższe tempo twardnienia.

5. Wnioski

Wyniki badań przedstawione w artykule pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Badania granulowanego żużła wielkopieczowego, prowadzone w Oddziale Szkla i Materiałów Budowlanych w Krakowie w ramach oceny zgodności żużła jako składnika cementu i betonu, potwierdziły znane zależności wpływu zawartości fazy szklistej oraz składu chemicznego żużła na jego aktywność hydrauliczną.
- Porównując wynik badań dużej liczby próbek granulowanego żużła wielkopieczowego z importu, należy podkreślić bardzo dobry wskaźnik aktywności hydraulicznej żużła krajowego, szczególnie z Huty Katowice, potwierdzony badaniami wytrzymałości cementów żużlowych.
- Bardzo dobra jakość krajowego żużła jako składnika cementów żużlowych wynika w pierwszym rzędzie z dużej zawartości fazy szklistej, w licznych próbkach określanej na poziomie 97–99%, przy bardzo korzystnym współczynniku aktywności $(CaO + MgO)/SiO_2$ wynoszącym ok. 1,3.
- W badanym żużlu z importu stwierdzano próbki o bardzo małej zawartości fazy szklistej, na granicy wymagań normy. Żużel ten pomimo dużych współczynników aktywności wykazywał obniżone wartości wskaźnika aktywności hydraulicznej, co potwierdziły wyniki badań aktywności hydraulicznej cementów żużlowych uzyskanych z tego żużła*.

* Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.

Literatura

- [1] PN-EN 197-1:2012 – Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [2] PN-B-19707:2013 – Cement – Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności.
- [3] K u r d o w s k i W., *Chemia cementu i betonu*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [4] PN-EN 15167-1:2007 – Mielony granulowany żużel wielkopiecowy stosowany do betonu, zapraw i zaczynu – Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności.
- [5] S a b e l a W., *Sposoby spieniania żużla wielkopiecowego: badania cech charakterystycznych żużli nadających się do spieniania*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1951.
- [6] O f i o k A., *Sposoby produkcji wielkopiecowego żużla krystalicznego ze szczególnym uwzględnieniem warunków krajowych*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1952.
- [7] M a ł o l e p s z y J., G i e r g i c z n y Z., S z w a b o w s k i J., Ś l i w i ń s k i J., *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów w nowej generacji*, Górażdże Cement Heidelberg CementGrup, Opole 2002.
- [8] B e r g t K., *Effect of magnesia content of blast-furnace slags on the strengths of slag cements*, [w:] *Proceedings of the Seventh Conference on the Silicate Industry*, Budapest 1965, s. 661.
- [9] S m o l c z y k H.G., *Slags structure and identification of slags*, [w:] *7th International Congress on the Chemistry of Cement Paris*, Vol. 1, Paris 1980, s. III-1/3.
- [10] R o j a k S.M., C h k o l n i k J., *Influence of physical and chemical features of blast furnace slags on their hydraulic activity*, [w:] *7th International Congress on the Chemistry of Cement Paris*, Vol. 2, Paris 1980, s. III-74.

TOMASZ BARAN
PIOTR FRANCUZ
ANNA SKAWIŃSKA
ALEKSANDRA TKOCZ

MOLDING PROPERTIES OF BLAST FURNACE SLAG CEMENTS WITH ADDITION OF GRANULAR BLAST FURNACE SLAG WITH DIFFERENT GLASSY PHASE CONTENT

Keywords: cement, granulated blast furnace slag, glassy phase, compressive strength.

Test results of properties of slag cements made of granulated blast furnace slag of different glassy phase content are presented in the paper. Research covered samples of blast furnace slags of significantly diverse glassy phase content, from 58% up to 99% by mass. Cements CEM II/A-S, CEM II/B-S and CEM III/A containing 15%, 30% and 60% of slag respectively have been prepared. Basic properties of cements, being a subject of requirements and conformity assessment of standard PN-EN 197-1 and PN-EN 15167-1, have been tested.

On the basis of obtained test results it has been confirmed that the glassy phase content has the highest impact on the hydraulic activity of blast furnace slag. The oxides ratio ($\text{CaO} + \text{MgO}/\text{SiO}_2$) of blast furnace slag is the second important parameter of its evaluation. With the same glassy phase content the higher is the oxides ratio the higher hydraulic activity of blast furnace slag is indicated. Test results of slag cements confirm these relationships.

Among examined of domestic and foreign blast furnace slags the highest hydraulic activity indexes have been indicated by slags from Huta Katowice and Huta Sendzimir containing 99% and 98% of glassy phase respectively; they have had definitely better properties comparing to foreign blast furnace slags imported in high amounts during recent years.