

## Wpływ aktywacji mechanicznej składników oraz stosunku w/c na wytrzymałość cementu hutniczego CEM III

## The influence of mechanical activation of components and w/c ratio on the strength of CEM III blast furnace cement

Mikołaj Ostrowski<sup>1</sup>, Tomasz Baran<sup>1,\*</sup>, Zbigniew Giergiczny<sup>2</sup>, Patrycja Miera<sup>2</sup>, Arkadiusz Janic<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Łukasiewicz Research Network - Institute of Ceramics and Building Materials in Cracow, Poland

<sup>2</sup>Silesian University of Technology in Gliwice, Faculty of Civil Engineering, Gliwice, Poland

<sup>3</sup>Betotech Technology Center Sp. z o.o., Dąbrowa Górnicza, Poland

Corresponding author: T. Baran, e-mail: [tomasz.baran@icimb.lukasiewicz.gov.pl](mailto:tomasz.baran@icimb.lukasiewicz.gov.pl)

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ aktywacji mechanicznej [przemiału] składników głównych cementu hutniczego oraz różnego współczynnika w/c na wytrzymałość cementu hutniczego CEM III. Do badań zastosowano aktywowany klinkier portlandzki oraz zmielony granulowany żużel wielkopiecowy. Stwierdzono, że na poziom wytrzymałości wczesnej większy wpływ ma stopień rozdrobnienia klinkieru portlandzkiego niż granulowanego żużla wielkopiecowego. Natomiast przemiał granulowanego żużla wielkopiecowego pozwala uzyskać znaczący przyrosty wytrzymałości w późniejszym okresie dojrzewania, od 14 dnia. Najbardziej efektywnym rozwiązaniem jest połączenie efektu synergicznego uzyskanego z aktywacji mechanicznej [przemiału] granulowanego żużla wielkopiecowego i obniżonego współczynnika w/c z 0,5 do 0,3. Działanie takie znacznie zwiększa zakres stosowania niskoemisyjnych cementów żużlowych w budownictwie.

**Słowa kluczowe:** cement hutniczy, granulowany żużel wielkopiecowy, aktywacja, wytrzymałość

### Summary

The article presents the effect of mechanical activation [grinding] of the main components of blast furnace cement and various w/c ratios on the strength of blast furnace cement CEM III. Activated Portland clinker and ground granulated blast furnace slag were used for the tests. It was found that the level of early strength is more influenced by the degree of grinding of Portland clinker than by granulated blast furnace slag. On the other hand, grinding of granulated blast furnace slag allows for significant increases in strength in the later maturation period, from the 14th day of maturation. The most effective solution is to combine the synergistic effect obtained from mechanical activation [grinding] of granulated blast furnace slag and a reduced w/c ratio from 0.5 to 0.3. Such action significantly increases the scope of application of low-emission slag cements in construction.

**Keywords:** blast furnace cement, granulated blast furnace slag, activation, strength

### 1. Wprowadzenie

Żużel wielkopiecowy [BFS - blast furnace slag] jest jednym z głównych składników cementu. Otrzymywany jest jako produkt uboczny w procesie produkcji surówki żelaza w wielkim piecu hutniczym w temperaturze 1300÷1500°C. Temperatura żużla po wyjściu wielkiego pieca wynosi ok. 1400°C i jest on szybko schładzany z pomocą strumienia wody. Ten ostatni proces nazywany jest granulacją, a jego efektem jest produkt o nazwie granulowany żużel wielkopiecowy [GBFS - granulated blast furnace slag] i ta forma żużla jest powszechnie stosowana jako składnik cementu.

### 1. Introduction

Blast furnace slag [BFS - blast furnace slag] is one of the main components of cement. It is obtained as a by-product in the process of producing pig iron in a blast furnace at a temperature of 1300÷1500 °C. The temperature of the slag after leaving the blast furnace is about 1400 °C and is quickly cooled by a water jet. The latter process is called granulation, and its effect is a product called granulated blast furnace slag [GBFS - granulated blast furnace slag] and this form of slag is commonly used in cement composition. Cements containing granulated blast furnace slag

Cementy zawierające jako składnik główny granulowany żużel wielkopieczowy uzyskuje się poprzez wspólny przemiał z innymi składnikami głównymi lub poszczególne składniki są oddzielne mielone i homogenizowane w mieszalnikach przemysłowych. W przypadkach cementów hutniczych CEM III z dużą zawartością zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego [GGBFS – ang. ground granulated blast furnace slag] preferowana jest metoda oddzielnego mielenia klinkieru z regulatorem czasu wiązania i GGBFS.

Podstawowe znaczenie w procesie hydratacji cementów zawierających GGBFS, zwłaszcza w początkowym okresie, ma proces rozpuszczania szkła. Szybkość reakcji GGBFS z wodą jest ograniczona szczególnie w początkowym okresie twardnienia betonów z udziałem cementów hutniczych CEM III/A zawierających w swoim składzie powyżej 50% GGBFS. Skutkuje to wydłużonym czasem wiązania i niskimi wytrzymałościami wczesnymi (1-4). Ta cecha utrudnia szersze stosowanie cementów hutniczych CEM III/A w okresie obniżonych temperatur oraz w prefabrykacji, natomiast jest bardzo pożądana w wykonawstwie masywnych elementów i konstrukcji betonowych (5,6). Istnieje wiele metod aktywacji cementów o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego [cementy niskoemisyjne], a do podstawowych może zaliczyć (7-14):

- aktywację mechaniczną cementu i/lub jego głównych składników realizowaną poprzez efektywny przemiał i/lub separację ziarnową; efektem jest przyspieszenie hydratacji cementu oraz wzrost aktywności pucolanowej i/lub hydraulicznej nieklinkierowych składników głównych cementu,
- aktywację poprzez modyfikację składu cementu niskoemisyjnego lub betonu w wyniku wprowadzenia składnika bardziej reaktywnego: bardziej reaktywny klinkier [cement],  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pył krzemionkowy, metakaolin, nanododatki [głównie nano-krzemionka],
- chemiczną aktywację poprzez zmianę odczynu pH cieczy porowej; [przyspieszenie rozpuszczalności fazy szklistej [amorficznej] składników nieklinkierowych [aktywatory bazujące na zasadowych związkach wapnia, aktywacja alkaliczna związkami potasu lub sodu, aktywacja chlorkami lub siarczanami].

W praktyce przemysłowej produkcji cementu najczęściej stosowana jest aktywacja mechaniczna poprzez przemiał wspólny lub oddzielny składników cementu. Przemiał może odbyć się w różnych urządzeniach mielących: młyn kulowy, poziomy młyn walcowy, młyn pionowy misowo-rolowy, wysokociśnieniowa prasa walcowa (15). Zużycie energii podczas przemiału granulowanego żużla wielkopieczowego zależy od zastosowanej techniki mielenia. Podczas przemiału żużla do powierzchni właściwej  $4300 \text{ cm}^2/\text{g}$  wg Blaine'a w młynie rolowo-misowym zużycie wynosi około  $36 \text{ kWh/t}$ , podczas gdy w przypadku młyna rurowo-kulowego [młyn kulowy] jest to około  $78 \text{ kWh/t}$ . Techniki mielenia są ciągle doskonalone i rozwijane np. wstępny przemiał żużla w prasie rolkowej [roller prasa], a następnie efektywny przemiał w młynie kulowym (15). Nowoczesne techniki mielenia cementów do bardzo dużych powierzchni właściwych pozwalają na skuteczną aktywację właściwości hydraulicznych granulowanego żużla wielkopieczowego

as the main component are obtained by joint grinding with other main components or individual components are separately ground and homogenized in industrial mixers. In the case of CEM III blast furnace cements high content of ground granulated blast furnace slag [GGBFS], the method of separate clinker grinding with a setting time regulator and GGBFS is preferred.

The glass dissolution process is of fundamental importance in the hydration process of cements containing GGBFS, especially in the initial period. The rate of reaction of GGBFS with water is limited, especially in the initial period of hardening of concretes with the use of CEM III/A blast furnace cements containing more than 50% GGBFS. This results in an extended setting time and low early strengths (1-4). This feature makes CEM III/A blast furnace cements difficult to use more widely during periods of low temperatures and in prefabrication, but is very desirable in the construction of massive concrete elements and structures (5,6). There are many methods of activating low-clinker Portland cements [low-emission cements], and the basic ones include (7-14):

- mechanical activation of cement and/or its main components achieved through effective grinding and/or grain separation; the effect is acceleration of cement hydration and increase of pozzolanic and/or hydraulic activity of non-clinker main components of cement,
- activation by modifying the composition of low-emission cement or concrete as a result of introducing a more reactive component: more reactive clinker [cement],  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , silica fume, metakaolin, nano-additives [mainly nanosilica],
- chemical activation by changing the pH of the pore liquid; [acceleration of the solubility of the glassy [amorphous] phase of non-clinker components [activators based on basic calcium compounds, alkaline activation with potassium or sodium compounds, activation with chlorides or sulphates].

In the industrial practice of cement production, mechanical activation is most often used through joint or separate grinding of cement components. Grinding can take place in various grinding devices: ball mill, horizontal roller mill, vertical bowl-roller mill, high-pressure roller press (15). Energy consumption during grinding of granulated blast furnace slag depends on the grinding technique used. During grinding of slag to a specific surface of  $4300 \text{ cm}^2/\text{g}$  according to Blaine in a roller-bowl mill, the consumption is about  $36 \text{ kWh/t}$ , while in the case of a tube-ball mill it is about  $78 \text{ kWh/t}$ . Grinding techniques are constantly being improved and developed, for example, preliminary grinding of slag in a roller press and then effective grinding in a ball mill (15). Modern techniques of grinding cements to very large specific surfaces allow for effective activation of hydraulic properties of granulated blast furnace slag by increasing the degree of fragmentation, while ensuring the stability of quality features of products and efficiency of the grinding process, due to energy consumption (15-17). This article presents an assessment of the influence of mechanical activation [grinding] of Portland clinker [ordinary Portland cement CEM I] and granulated blast furnace slag on the formation of strength of CEM

poprzez wzrost stopnia rozdrobnienia, z zapewnieniem stałości cech jakościowych produktów i efektywności procesu mielenia, z uwagi na energochłonność (15-17).

W niniejszym artykule przedstawiono ocenę wpływu aktywacji mechanicznej [przemiału] klinkieru portlandzkiego [cementu portlandzkiego CEM I] oraz granulowanego żużla wielkopieczowego na kształtowanie wytrzymałości cementów hutniczych CEM III. Przeanalizowano także wpływ współczynnika woda/cement [w/c] na dynamikę narastania wytrzymałości cementów hutniczych CEM III. Wielkość współczynnika w/c, według zapisów normy PN-EN 206+A2:2021-08 (18) jest jednym z podstawowych czynników technologicznych wpływających na kształtowanie trwałości betonu w różnych oddziaływaniach środowiskowych.

## 2. Właściwości składników cementu i metodyka badań

W badaniach zastosowano dwa rodzaje cementu portlandzkiego: cementu portlandzkiego CEM I 42,5R i półproduktu CEM I. Cement portlandzki CEM I 42,5R pochodzący z przemysłowej produkcji został zastosowany do oceny wpływu przemiału klinkieru portlandzkiego na przyrost wytrzymałości cementu hutniczego CEM III/A zawierającego w swoim składzie 50% GGBFS o powierzchni właściwej 3800 cm<sup>2</sup>/g.

Wstępnie zmielony klinkier portlandzki z określonym dodatkiem gipsu do powierzchni 4100 cm<sup>2</sup>/g, stanowi tzw. półprodukt CEM I, który stosowany był w produkcji cementów hutniczych w systemie mieszania składników. Skład chemiczny stosowanych: cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, półproduktu CEM I i zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego [GGBFS] przedstawiono w tablicy 1.

Zawartość fazy szklistej w GBFS wynosiła 98,6% (22). Stosowany w badaniach GGBFS spełniał wszystkie wymagania normy PN-EN 197-1:2012 (21).

Proces homogenizacji składników cementu hutniczego CEM III [półproduktu CEM I i GGBFS] prowadzono w półtechnicznym mieszalniku mechanicznym.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTÓW PORTLANDZKICH CEM I I ŻUŻLA UŻYTYCH W BADANIU (19,20)

CHEMICAL COMPOSITION OF PORTLAND CEMENTS AND GGBFS USED IN STUDY (19,20)

Materiał / Material	Udział składnika, % masy / Compound content, % by mass									
	Strata prażenia Loss on ignition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> *
Przemysłowy CEM I 42,5R / Industrial CEM I 42.5R	2.80	19.80	5.10	2.60	64.0	1.60	3.10	0.11	0.70	0.57
Półprodukt CEM I / Semiproduct CEM I	1.83	19.10	4.60	2.40	64.4	1.14	5.14	0.07	0.75	0.56
Żużel wlp./ GBFS	0,35	38,40	7,77	0,99	43,69	5,77	1,12	0,53	0,54	0,88

\*Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> = Na<sub>2</sub>O + 0,658 x K<sub>2</sub>O [% masy /% by mass]

III blast furnace cements. The influence of water/cement [w/c] ratio on the dynamics of strength growth of CEM III blast furnace cements was investigated. The value of the w/c ratio, according to the provisions of the PN-EN 206+A2:2021-08 standard (18), is one of the basic technological factors influencing the formation of concrete durability under various environmental impacts.

## 2. Properties of cement components and research methodology

Two types of Portland cement were used in the research: CEM I 42.5R ordinary Portland cement and CEM I semi-finished product. CEM I 42.5R Portland cement from industrial production was used to assess the effect of Portland clinker grinding on the strength growth of CEM III/A blast furnace cement containing 50% GGBFS with a specific surface area of 3800 cm<sup>2</sup>/g.

Pre-ground Portland clinker with a specific addition of gypsum to a surface area of 4100 cm<sup>2</sup>/g constitutes the so-called CEM I semi-finished product, which was used in the production of blast furnace cements in the component mixing system. The chemical composition of the CEM I 42.5R Portland cement, CEM I semi-finished product and GBFS used is presented in Table 1.

The glassy phase content in GBFS was 98.6% (22). The GBFS used in the tests met all the requirements of the PN-EN 197-1:2012 standard (21).

The homogenization process of the CEM III blast furnace cement components [CEM I semi-finished product and GGBFS] was carried out in a semi-technical mechanical mixer.

The influence of GGBFS with different degrees of fineness on the rheological and mechanical properties of cements was determined within the scope of our own research. The w/c ratio in the tested standard mortars was 0.5. The strength of the tested cements was also determined with a reduced w/c ratio of 0.4 and 0.3. In order to obtain a mortar consistency similar to that obtained with CEM I 42.5R cement at w/c=0.5, a fluidifying admixture [superplasticizer] based on polycarboxylic ether was used.

The mechanical properties and setting times of cements were determined according to the methods included in the PN-EN 196-

W zakresie badań własnych określono wpływ GGBFS o różnym stopniu rozdrobnienia na właściwości reologiczne i mechaniczne cementów. Współczynnik w/c w badanych zaprawach normowych wynosił 0,5. Określono także wytrzymałość badanych cementów przy obniżonym współczynniku w/c wynoszącym 0,4 i 0,3. W celu otrzymania konsystencji zaprawy o zbliżonej konsystencji do otrzymanej na cemencie CEM I 42,5R przy w/c = 0,5, stosowano domieszkę upłynniającą [superplastifikator] oparty na eterze polikarboksylowym.

Właściwości mechaniczne i czasy wiązania cementów określono według metod zawartych w normach PN-EN 196-1:2016 (23) i PN-EN 196-3:2011 (24). Badanie konsystencji świeżej zaprawy cementowej wykonano według PN-EN 1015-3:2000/A1:2005 (25).

### 3. Wyniki badań i ich omówienie

#### 3.1. Wpływ stopnia zmielenia cementu portlandzkiego na wytrzymałość cementu hutniczego CEM III/A

W badaniach zastosowano cement portlandzki CEM I 42,4R o powierzchni właściwej 3700 cm<sup>2</sup>/g z przemysłowej produkcji, który został aktywowany mechanicznie [rozmieszony] do powierzchni właściwej 4900 cm<sup>2</sup>/g. Wyniki badań wytrzymałości cementu zawierającego 50% GGBFS o powierzchni właściwej 3800 cm<sup>2</sup>/g zamieszczono na rys. 1.

Z zamieszczonych na rys. 1 wyników widać pozytywny wpływ przemiału cementu [klinkieru portlandzkiego] na wytrzymałość na ściskanie cementu hutniczego CEM III/A zawierającego 50% GGBFS. Wytrzymałość wczesna [po 2 dniach] wzrosła z poziomu 10,3 MPa na 16,8 MPa [zwiększenie o ponad 60%]. Zanotowano także wyższe wytrzymałości na ściskanie cementu po upływie 7 i 28 dni.

#### 3.2. Wpływ stopnia zmielenia granulowanego żużla wielkopiecowego i współczynnika w/c na wytrzymałość cementu hutniczego CEM III

W badaniach stosowano oddzielnie zmielony GGBFS do powierzchni 3800 cm<sup>2</sup>/g, 4500 cm<sup>2</sup>/g i 6000 cm<sup>2</sup>/g wg Blaine'a. Przygotowano dwa rodzaje cementów hutniczych CEM III o składzie przedstawionym w tabelicy 2.

Uzyskane rodzaje cementów opisano symbolami II [50% GGBFS] i III [70% GGBFS] [tabelica 2 i 3]. W tabelicy 3 zawarte są wyniki oznaczenia czasu wiązania i konsystencji [rozplływ] zapraw. Cementy z udziałem GGBFS [50 i 70%] miały wydłużone czasy początku i końca wiązania w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I 42,5R [tabelica 3]. Natomiast poprawie uległy właściwości reologiczne cementów zawierających GGBFS w stosunku do cementu referencyjnego CEM I – największy rozplływ zaprawy uzyskano przy zastosowaniu 70% GGBFS o powierzchni właściwej 3800 cm<sup>2</sup>/g. Przy stosowaniu GGBFS o powierzchni właściwej 4500 cm<sup>2</sup>/g i 6000 cm<sup>2</sup>/g rozplływ zapraw był

1:2016 (23) and PN-EN 196-3:2011 (24) standards. The test of the consistency of fresh cement mortar was performed according to PN-EN 1015-3:2000/A1:2005 (25).

### 3. Test results and their discussion

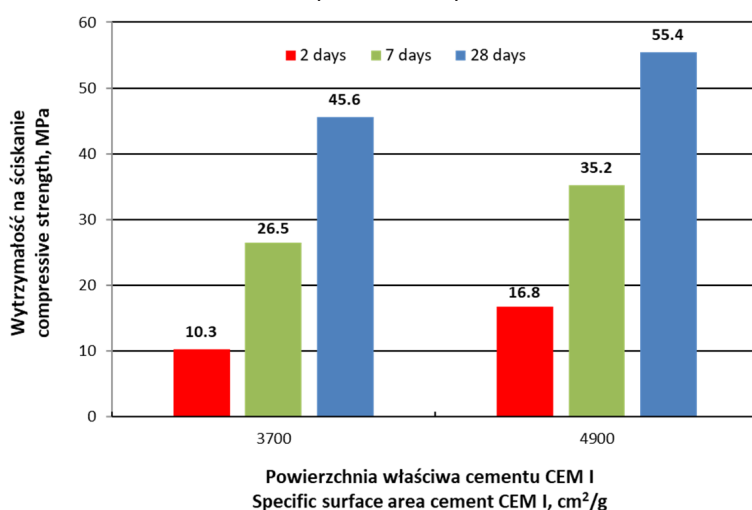
#### 3.1. The influence of the degree of grinding of Portland cement on the strength of CEM III/A blast furnace cement

In the tests, Portland cement CEM I 42.4R with a specific surface area of 3700 cm<sup>2</sup>/g from industrial production was used, which was mechanically activated [grinded] to a specific surface area of 4900 cm<sup>2</sup>/g. The results of the strength tests of cement containing 50% GGBFS with a specific surface area of 3800 cm<sup>2</sup>/g are presented in Fig. 1.

The results presented in Fig. 1 show a positive effect of cement grinding [Portland clinker] on the compressive strength of CEM III/A blast furnace cement containing 50% GGBFS. Early strength [after 2 days] increased from 10.3 MPa to 16.8 MPa [an increase of over 60%]. Higher cement compressive strengths were also noted after 7 and 28 days.

#### 3.2. The effect of the degree of grinding of granulated blast furnace slag and the w/c ratio on the strength of CEM III blast furnace cement

In the tests, GGBFS ground separately to a surface of 3800 cm<sup>2</sup>/g, 4500 cm<sup>2</sup>/g and 6000 cm<sup>2</sup>/g according to Blaine was used. Two types of CEM III blast furnace cements were prepared with the composition presented in Table 2. The obtained types of cements were described by the symbols II [50% GGBFS] and III [70% GGBFS] [Tables 2 and 3]. Table 3 contains the results of determining the setting time and consistency [flow] of the mortars. Cements with the share of GGBFS [50 and 70%] had extended initial and final



Rys. 1. Powierzchnia właściwa cementu portlandzkiego CEM I, a wytrzymałość na ściskanie cementu zawierającego 50% GGBFS o powierzchni właściwej 3800 cm<sup>2</sup>/g.

Fig. 1. Specific surface area of Portland cement CEM I and compressive strength of cement containing 50% GGBFS with a specific surface area of 3800 cm<sup>2</sup>/g.

Tablica 2 / Table 2

## SKŁAD CEMENTÓW DO BADAŃ LABORATORYJNYCH

## COMPOSITION OF CEMENTS FOR LABORATORY TESTS

Opis cementu Description of cement	Składnik / component				
	Półprodukt CEM I / Semiproduct CEM I	Granulowany żużel wielkopieczowy / GGBFS			Udział składnika, % masy / Compound content, % by mass
		a	b	c	
		3800 cm <sup>2</sup> /g	4500 cm <sup>2</sup> /g	6000 cm <sup>2</sup> /g	
II	50	50			50
III	30	70			70

a - cement z żużlem / cement with GGBFS, 3800 cm<sup>2</sup>/gb - cement z żużlem / cement with GGBFS, 4500 cm<sup>2</sup>/gc - cement z żużlem / cement with GGBFS, 6000 cm<sup>2</sup>/g

Tablica 3 / Table 3

## CZASY WIĄZANIA CEMENTÓW WG (24) I KONSYSTENCJA ZAPRAW WG PN-EN 1015-3:2000/A1:2005 (25).

## SETTING TIME OF CEMENTS ACCORDING TO (24) AND CONSISTENCY OF MORTARS ACCORDING TO PN-EN 1015-3:2000/A1:2005 (25).

Nr cementu / no. of cement	Rodzaj cementu / type of cement	Czas wiązania, min / setting, time		Rozpływ, cm / consistency, cm	w/c	Superplastyfikator, % m.c. / Superplasticizer, % of mass of cement
		Początek / initial	Koniec / final			
Ref.	CEM I 42,5R [przem./ industrial]	162	210	17.5	0.5	-
II a	50% GGBFS 50% CEM I	284	364	22.8		
III a	70% GGBFS 30% CEM I	443	563	23.9		
II b	50% GGBFS 50% CEM I	245	324	21.6		
III b	70% GGBFS 30% CEM I	323	406	23.2		
II c	50% GGBFS 50% CEM I	215	278	21.1		
III c	70% GGBFS 30% CEM I	235	295	22.8		
II a	50% GGBFS 50% CEM I	-	-	17.5	0.4	0.4
III a	70% GGBFS 30% CEM I	-	-	17.5	0.3	4.2
II a	50% GGBFS 50% CEM I	-	-	17.5		
III a	70% GGBFS 30% CEM I	-	-	17.5		
III c	70% GGBFS 30% CEM I	-	-	17.5	0.3	4.4

mniejszy niż przy GGBFS o powierzchni właściwej 3800 cm<sup>2</sup>/g [tablica 3]. W składzie zapraw o obniżonym stosunku w/c 0,3 i 0,4 stosowano dodatek superplastyfikatora w ilości pozwalającej na uzyskanie rozptywu zbliżonego do cementu portlandzkiego CEM I 42,5R przy współczynniku w/c = 0,5 [tablica 3].

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie cementów z udziałem GGBFS dojrzewających do 90 dni przedstawiono w tablicy 4.

Na rys. 2 przedstawiono wytrzymałość na ściskanie cementu z 50% zawartością GGBFS [cement hutniczy CEM III/A]. Zauważyć można, iż zwiększenie powierzchni właściwej żużla z 3800 cm<sup>2</sup>/g do 6000 cm<sup>2</sup>/g spowodowało przyrost wytrzymałości wczesnej [po 2 dniach] z 16,4 MPa na 17,6 MPa [tj. zwiększenie o ok. 7,3%]. Znacznie wyższe są przyrosty wytrzymałości w pozostałych terminach badań tj. po 7, 14, 28 i 90 dniach [tablica 4]. Znaczący wpływ aktywacji mechanicznej [przemiału] GGBFS jest widoczny po upływie 14, 28 i 90 dni. Po upływie 14, 28 i 90 dni dojrzewania wytrzymałość na ściskanie cementów zawierających 50% GGBFS

setting times compared to Portland cement CEM I 42.5R [Table 3]. On the other hand, the rheological properties of cements containing GGBFS were improved compared to the reference cement CEM I – the highest mortar flow was obtained with the use of 70% GGBFS with a specific surface area of 3800 cm<sup>2</sup>/g. When using GGBFS with a specific surface area of 4500 cm<sup>2</sup>/g and 6000 cm<sup>2</sup>/g, the mortar flow was lower than with GGBFS with a specific surface area of 3800 cm<sup>2</sup>/g [Table 3]. In the composition of mortars with a reduced w/c ratio of 0.3 and 0.4, a superplasticizer was added in an amount that allowed to obtain a flow similar to that of Portland cement CEM I 42.5R at a w/c ratio of 0.5 [Table 3].

The results of compressive strength tests of cements containing GGBFS cured for up to 90 days are presented in Table 4.

Fig. 2 shows the compressive strength of cement with 50% GGBFS content [CEM III/A blast furnace cement]. It can be seen that the increase in the specific surface area of slag from 3800 cm<sup>2</sup>/g to 6000 cm<sup>2</sup>/g caused an increase in the early strength [after 2 days]

Tablica 4 / Table 4

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE CEMENTÓW BADANYCH PRZY RÓŻNYM W/C Z GGBFS O RÓŻNEJ POWIERZCHNI WŁAŚCIWEJ.

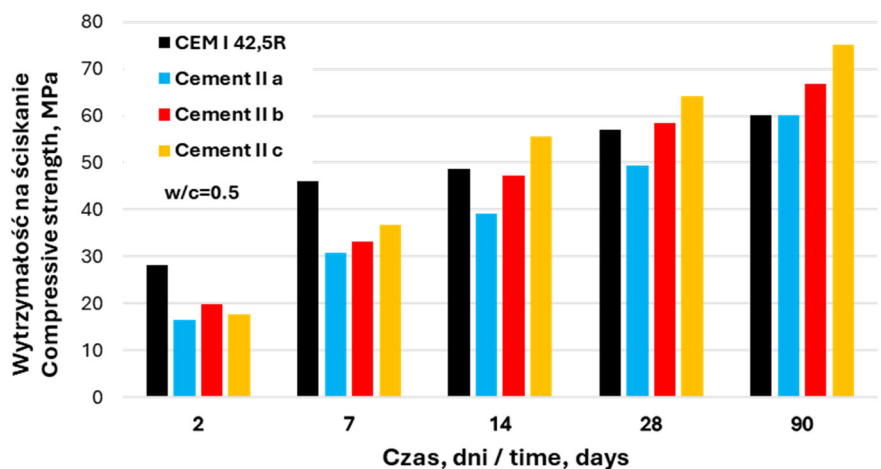
COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENTS WITH DIFFERENT W/C RATIO AND WITH DIFFERENT A SPECIFIC SURFACE AREA OF GGBFS.

Nr cementu No. of cement	Rodzaj cementu / type of cement	Wytrzymałość na ściskanie. MPa. po upływie dni [d] Compressive strength. MPa. afeter days [d]					w/c	Klasa cementu Cement class
		2 d	7 d	14 d	28 d	90 d		
Ref.	CEM I 42.5R [przemysłowy]	28.2	46.1	48.8	57.1	60.1	0.5	
II a	50% GGBFS 50% CEM I	16.4	30.7	39.2	49.4	60.2		42.5N
III a	70% GGBFS 30% CEM I	7.2	17.9	27.9	36.4	42.3		32.5N
II b	50% GGBFS 50% CEM I	16.9	33.1	47.2	58.4	66.9		52.5L
III b	70% GGBFS 30% CEM I	8.9	27.2	47.6	57.3	64.4		42.5L
II c	50% GGBFS 50% CEM I	17.6	36.7	55.6	64.2	75.1		52.5L
III c	70% GGBFS 30% CEM I	11.5	33.8	55.9	63.1	72.7		52.5L
II a	50% GGBFS; 50% CEM I	20.0	50.3	61.0	74.8	87.8	0.4	
III a	70% GGBFS 30% CEM I	9.9	33.2	42.1	52.3	68.0		
II a	50% GGBFS 50% CEMI	18.1	55.3	66.3	77.8	102.8	0.3	
III a	70% GGBFS 30% CEM I	9.4	42.7	52.9	64.7	88.3		
III c	70% GGBFS 30% CEMI	17.1	65.2	85.2	100.1	113.1		

o pow. wł. 6000 cm<sup>2</sup>/g jest wyższa od wytrzymałości cementu portlandzkiego CEM I 42,5R [referencyjnego], natomiast wytrzymałość na ściskanie cementu zawierającego 50% GGBFS o pow. wł. 4500 cm<sup>2</sup>/g jest wyższa od wytrzymałości cementu portlandzkiego CEM I po upływie 28 i 90 dni dojrzewania. Ponadto zanotowano znaczący przyrost wytrzymałości pomiędzy 28 a 90 dniem dojrzewania dla wszystkich cementów zawierających GGBFS.

Zwiększenie udziału GGBFS do 70% [cement hutniczy CEM III/B] spowodowało spadek wytrzymałości wczesnej [po 2 dniach dojrzewania] w stosunku do cementu zawierającego 50% GGBFS [tablica 4]. Jednakże przy stosowaniu GGBFS o powierzchni właściwej 6000 cm<sup>2</sup>/g wytrzymałość na ściskanie wyniosła po 2 dniach 11,5 MPa, wykazując 60% przyrost wytrzymałości w stosunku do cementu z udziałem żużla o powierzchni wł. 3800 cm<sup>2</sup>/g [tablica 4, cementy III a i III c]. Cement III c osiąga wytrzymałości na ściskanie wyższe niż cement portlandzki CEM I 42,5R [referencyjny] już od 14 dnia dojrzewania [tablica 4, rys. 3]. Natomiast cement zawierający 70% GGBFS o powierzchni właściwej 4500 cm<sup>2</sup>/g po 28 dniach dojrzewania ma poziom wytrzymałości na ściskanie zbliżony

from 16.4 MPa to 17.6 MPa [i.e. an increase by approx. 7.3 %]. The strength increases are much higher at the other test dates, i.e. after 7, 14, 28 and 90 days [Table 4]. A significant effect of mechanical activation [grinding] of GGBFS is visible after 14, 28 and 90 days. After 14, 28 and 90 days of maturation, the compressive strength of cements containing 50 % GGBFS with an area of The compressive strength of cement containing 50 % GGBFS with a density of 6000 cm<sup>2</sup>/g is higher than that of Portland cement CEM



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie cementów z 50% udziałem GGBFS

Fig. 2. Compressive strength of cements with 50% quantity of GGBFS

do cementu portlandzkiego CEM I 42,5R oraz znacznie wyższą wytrzymałość na ściskanie po upływie 90 dni dojrzewania [tablica 4, rys. 3].

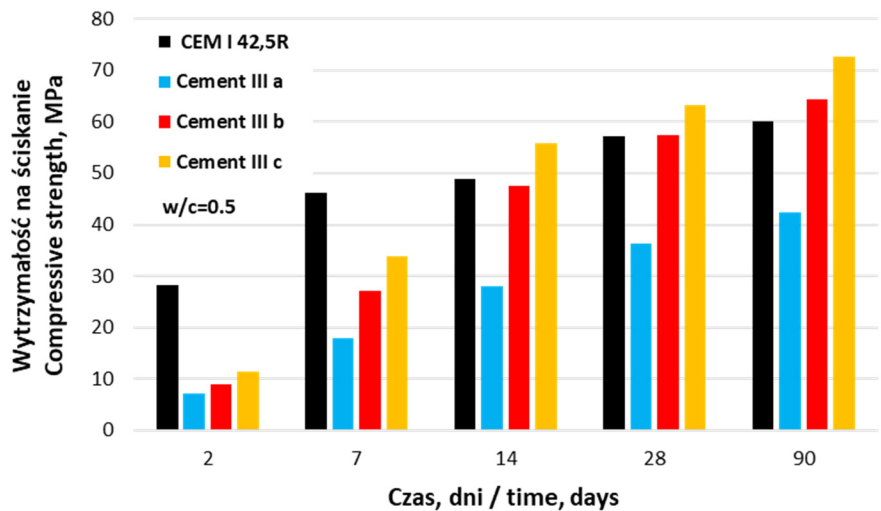
W tablicy 4 przedstawiono także klasy wytrzymałościowe cementów. Cement III c zawierający GGBFS o powierzchni właściwej 6000 cm<sup>2</sup>/g spełnia wymagania normowe dla cementu hutniczego CEM III/B 52,5L. Cement III b zawierający GGBFS o powierzchni właściwej 4500 cm<sup>2</sup>/g spełnia klasę wytrzymałości cementu hutniczego CEM III/B 42,5L, natomiast cement III a zawierający GGBFS o powierzchni właściwej 3800cm<sup>2</sup>/g spełnia klasę wytrzymałości cementu hutniczego CEM III/B 32,5N [tablica 5]. Z kolei cementy zawierające 50 % GGBFS posiadają klasę wytrzymałości dla cementu hutniczego CEM III/A 42,5N [cement II a] oraz cementu hutniczego CEM III/A 52,5L [cementy II b i II c].

Uzyskane klasy wytrzymałości cementu, zwłaszcza przy stosowaniu GGBFS o powierzchni właściwej 4500 cm<sup>2</sup>/g i 6000 cm<sup>2</sup>/g pozwalają na znacznie szerszy zakres stosowania cementu hutniczego CEM III/A,B w budownictwie m.in. do wykonywania betonu wysokich klas wytrzymałościowych, jak i w prefabrykacji oraz prac prowadzonych w obniżonej temperaturze zewnętrznej.

Na rys. 4 i 5 przedstawiono poziom wytrzymałości na ściskanie zapraw normowych uzyskanych przy współczynniku w/c = 0,3 i 0,4 dla cementu zawierającego 50% i 70% GGBFS o powierzchni właściwej 3800 cm<sup>2</sup>/g. Uzyskane wytrzymałości na ściskanie wczesnej [po 2 dniach], normowej [po 28 dniach] i długoterminowej [90 dniowej] są znacznie wyższe niż uzyskane przy w/c = 0,5. Szczególnie istotny dla praktyki budowlanej jest zauważalny wzrost wytrzymałości wczesnej po 2 dniach do blisko 20 MPa dla cementu zawierającego 50% GGBFS [w/c = 0,4; rys. 4] i 17,1 MPa dla cementu zawierającego 70% GGBFS [w/c 0,3; rys. 5].

Wzrost stopnia rozdrobnienia GGBFS z 3800 cm<sup>2</sup>/g do 6000 cm<sup>2</sup>/g pozwala na uzyskanie wysokich wytrzymałości na ściskanie cementu, przy obniżonym współczynniku w/c do 0,3, przekraczających wytrzymałość na ściskanie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R oznaczoną przy w/c=0,5, już od 7 dnia dojrzewania [tablica 5, rys.6]. Uzyskane poziomy wytrzymałości na ściskanie po 28 i 90 dniach dojrzewania cementu z 70% udziałem GGBFS o powierzchni właściwej 6000 cm<sup>2</sup>/g są o ponad 70% wyższe od wytrzymałości cementu referencyjnego CEM I 42,5R [tablica 4].

Stwierdzono także znaczny wzrost wytrzymałości w późniejszych okresach twardnienia zapraw na cementach żuźlowych o obniżonym współczynniku wodno-cementowym w/c [tablica 4, rys.6]. Znaczący przyrost wytrzymałości na ściskanie cementu obserwuje się po 7 dniach twardnienia, z poziomu 17,9 MPa dla zaprawy przy w/c=0,5 i powierzchni właściwej granulowanego żuźla 3800 cm<sup>2</sup>/g do 65,2 MPa dla zaprawy przy w/c=0,3 i powierzchni właściwej żuźla 6000 cm<sup>2</sup>/g. Podobny przyrost obserwujemy po 28 dniach twardnienia, gdzie wytrzymałość na ściskanie wyniosła 36,4 MPa



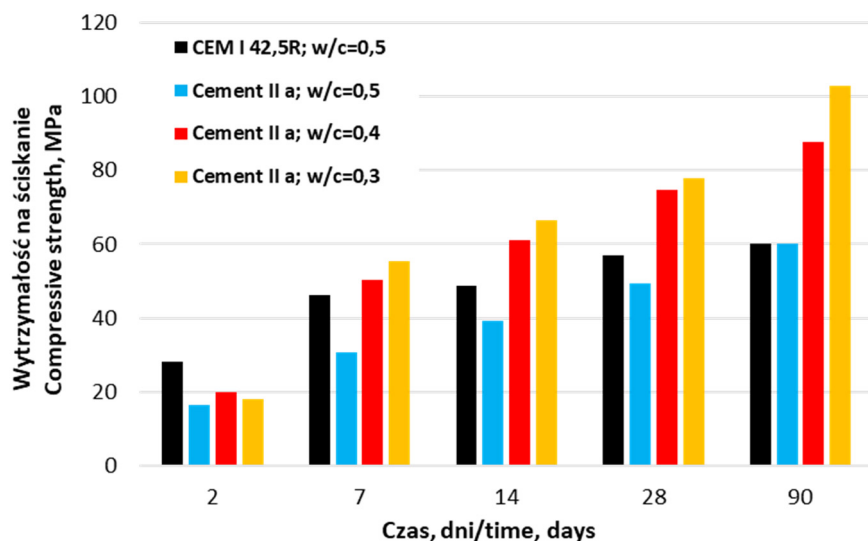
Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie cementów z 70% udziałem GGBFS

Fig. 3. Compressive strength of cements with 70% quantity of GGBFS

I 42.5R [reference], while the compressive strength of cement containing 50 % GGBFS with a density of 4500 cm<sup>2</sup>/g is higher than that of Portland cement CEM I after 28 and 90 days of curing. Furthermore, a significant increase in strength was noted between 28 and 90 days of curing for all cements containing GGBFS.

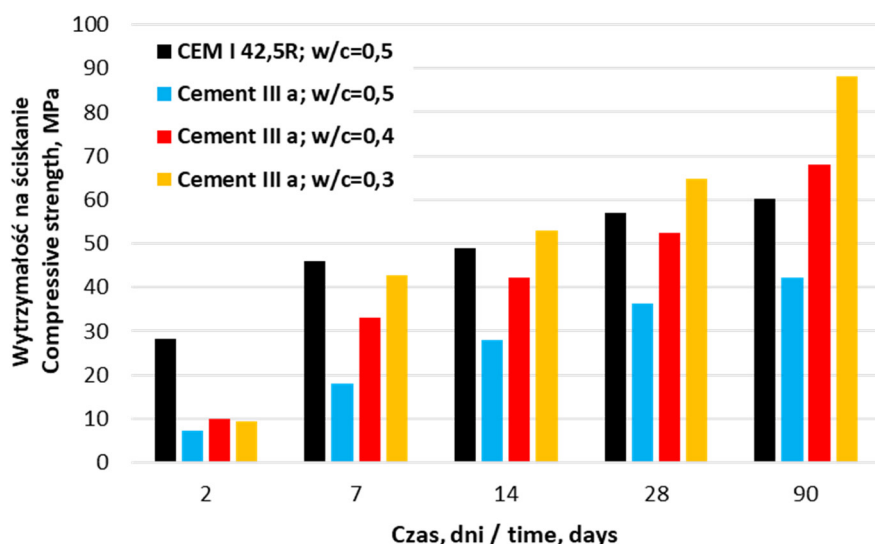
Increasing the share of GGBFS to 70 % [blast cement CEM III/B] resulted in a decrease in early strength [after 2 days of curing] compared to cement containing 50 % GGBFS [Table 4]. However, when using GGBSF with a specific surface area of 6000 cm<sup>2</sup>/g, the compressive strength was 11.5 MPa after 2 days, demonstrating a 60 % increase in strength compared to cement with a slag content of 3800 cm<sup>2</sup>/g [Table 4, cements III a and III c]. Cement III c achieves compressive strengths higher than Portland cement CEM I 42.5R [reference] already from the 14th day of curing [Table 4, Fig. 3]. On the other hand, cement containing 70 % GGBFS with a specific surface area of 4500 cm<sup>2</sup>/g after 28 days of curing has a compressive strength level similar to Portland cement CEM I 42.5R and a significantly higher compressive strength after 90 days of curing [Table 4, Fig. 3].

Table 4 also presents the strength classes of cements. Cement III c containing GGBFS with a specific surface area of 6000 cm<sup>2</sup>/g meets the standard requirements for blast furnace cement CEM III/B 52.5L. Cement III b containing GGBFS with a specific surface area of 4500 cm<sup>2</sup>/g meets the strength class of blast furnace cement CEM III/B 42.5L, while cement III a containing GGBFS with a specific surface area of 3800 cm<sup>2</sup>/g meets the strength class of CEM III/B 32.5N [Table 4]. In turn, cements containing 50 % GGBFS have the strength class for blast furnace cement CEM III/A 42.5N [cement II a] and blast furnace cement CEM III/A 52.5L [cements II b and II c]. The obtained cement strength classes, especially when using GGBFS with a specific surface of 4500 cm<sup>2</sup>/g and 6000 cm<sup>2</sup>/g, allow for a much wider range of use of CEM III/A,B blast furnace cement in construction, including for making high-strength concrete, as well as in prefabrication and work carried out at low outside temperatures. Fig. 4 and 5 show



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie cementów z 50% udziałem granulowanego żużla zmielonego do powierzchni wł. 3800 cm<sup>2</sup>/g, przy zmiennym współczynniku w/c

Fig. 4. Compressive strength of cements with 50% quantity of GGBFS ground to the surface area 3800 cm<sup>2</sup>/g, with a variable w/c ratio



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie cementów z 70% udziałem granulowanego żużla zmielonego do powierzchni wł. 3800 cm<sup>2</sup>/g, przy zmiennym współczynniku w/c

Fig. 5. Compressive strength of cements with 70% quantity of GGBFS ground to the surface area 3800 cm<sup>2</sup>/g, with a variable w/c ratio

dla w/c = 0,5 oraz 100,1 MPa dla w/c = 0,3 [tablica 4, rys.6]. Ponadto zaprawy wykazują dalszy bardzo duży przyrost wytrzymałości po 90 dniach twardnienia.

Uzyskane wyniki wpływu aktywacji mechanicznej żużla i obniżonego współczynnika wodno-cementowego pozwalają zakładać możliwość projektowania betonów wysokiej wytrzymałości o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego [cementu niskoemisyjnego].

#### 4. Wnioski z badań

Przeprowadzony zakres badań i uzyskane wyniki pozwoliły autorom na wyciągnięcie następujących wniosków.

the level of compressive strength of standard mortars obtained with a w/c coefficient of 0.3 and 0.4 for cement containing 50 % and 70 % GGBFS with a specific surface of 3800 cm<sup>2</sup>/g. The obtained early [after 2 days], standard [after 28 days] and long-term [90 days] compressive strengths are much higher than those obtained with w/c = 0.5. The noticeable increase in early strength after 2 days to almost 20 MPa for cement containing 50 % GGBFS [w/c = 0.4; Fig. 4] and 17.1 MPa for cement containing 70 % GGBFS [w/c 0.3; Fig. 5].

The increase in the degree of fineness of GGBFS from 3800 cm<sup>2</sup>/g to 6000 cm<sup>2</sup>/g allows for obtaining high compressive strength of cement, with a reduced w/c ratio to 0.3, exceeding the compressive strength of Portland cement CEM I 42.5R marked at w/c=0.5, already from the 7th day of maturation [Table 4, Fig. 6]. The obtained levels of compressive strength after 28 and 90 days of maturation of cement with 70 % share of GGBFS with a specific surface of 6000 cm<sup>2</sup>/g are more than 70 % higher than the strength of the reference cement CEM I 42.5R [Table 4]. A significant increase in strength was also observed in later periods of hardening of mortars on slag cements with a reduced water-cement w/c ratio [Table 4, Fig. 6]. A significant increase in the compressive strength of cement is observed after 7 days of hardening, from 17.9 MPa for the mortar at w/c=0.5 and the specific surface of granulated slag of 3800 cm<sup>2</sup>/g to 65.2 MPa for the mortar at w/c=0.3 and the specific surface of slag of 6000 cm<sup>2</sup>/g. A similar increase is observed after 28 days of hardening, where the compressive strength was 36.4 MPa for w/c = 0.5 and 100.1 MPa for w/c = 0.3 [Table 4, Fig. 6]. In addition, the mortars show a further very large increase in strength after 90 days of hardening.

The obtained results of the effect of mechanical activation of slag and a reduced water-cement ratio allow us to assume the possibility of designing high-strength concretes with a low content of Portland clinker [low-emission cement].

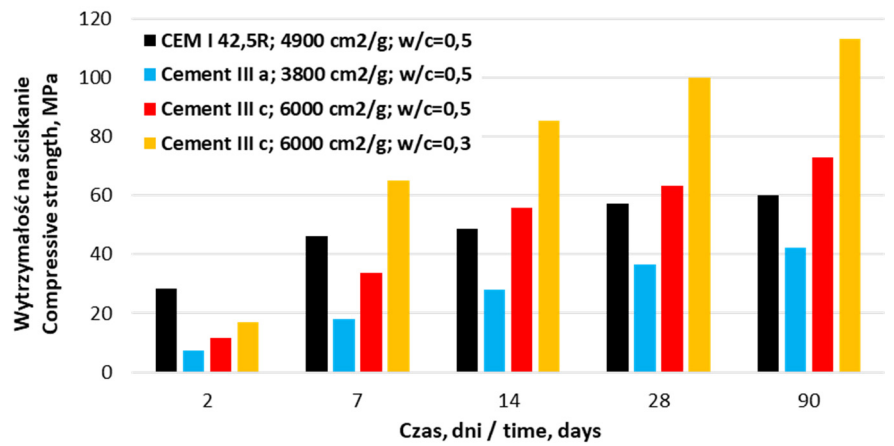
#### 4. Conclusions

The scope of the research conducted and the results obtained allowed the authors to draw the following conclusions.

- The use of GGBFS in the composition of CEM III/A,B blast furnace cement results in an extension of the start and end time of setting, an improvement in rheological properties and



- Stosowanie GGBFS w składzie cementu hutniczego CEM III/A,B powoduje wydłużenie czasu początku i końca wiązania, poprawę właściwości reologicznych oraz znaczne obniżenie wytrzymałości wczesnych, zwłaszcza przy 70% zawartości GGBFS w składzie cementu.
- Bardziej efektywnym rozwiązaniem w kształtowaniu wytrzymałości wczesnej [po 2 dniach dojrzewania] cementu hutniczego CEM III/A zawierającego 50% GGBFS jest zwiększanie stopnia rozmielenia klinkieru portlandzkiego. Klinkier portlandzki jest składnikiem cementu łatwiej rozmielającym się w porównaniu z GBFS. Wskaźniki mielności  $W_i$  [Work Index] metodą Bonda dla klinkieru osiągają wartości 13-16 kWh/t, natomiast dla granulowanego żużla wielopieczowego wartości 18-22 kWh/t. Mielenie klinkieru jest więc bardziej ekonomiczne w praktyce przemysłowej [niższe koszty przemiału, wyższa wydajność urządzeń przemiałowych]. Wyższy stopień przemiału klinkieru skutkuje przyspieszeniem hydratacji faz krzemianowych, a produkt hydratacji  $Ca(OH)_2$  pełni rolę aktywatora.
- Zwiększenie rozwinięcia powierzchni GGBFS z 3800  $cm^2/g$  do 6000  $cm^2/g$  powoduje znaczący wzrost wytrzymałości na ściskanie cementu hutniczego CEM III/A,B zawierającego zarówno 50% i 70% GGBFS począwszy od 7 dnia dojrzewania [szczególnie widoczny dla cementu zawierającego 70% GGBFS o pow. właściwej 6000  $cm^2/g$ ].
- Cementy hutnicze CEM III/A,B wykazują się znaczącym przyrostem wytrzymałości pomiędzy 28 a 90 dniem twardnienia.
- Poprzez aktywację mechaniczną GGBFS można uzyskać cementy hutnicze CEM III/A,B klasy wytrzymałościowej od 32,5N do klasy wytrzymałościowej 52,5N o możliwym szerokim zastosowaniu w budownictwie.
- Najbardziej efektywnym rozwiązaniem dla praktyki budowlanej jest stosowanie cementów hutniczych CEM III/A,B w składzie betonu o niskim współczynniku woda/cement.
- Połączenie efektu synergicznego wynikającego z aktywacji mechanicznej GGBFS [przemiału] i obniżonego współczynnika w/c z 0,5 do 0,3 pozwala na uzyskanie cementów o wytrzymałości na ściskanie znacznie przewyższającej wytrzymałość cementu portlandzkiego CEM I i pozwala na znaczne rozszerzenie zakresu stosowania cementów hutniczych CEM III/A,B z wysoką zawartością GGBFS [50%÷70%] w składzie betonów wysokowytrzymałościowych, jak i w składzie elementów prefabrykowanych.
- Cementy hutnicze CEM III są cementami niskoemisyjnymi w porównaniu z emisyjnością cementu portlandzkiego CEM I [ograniczenie zawartości klinkieru portlandzkiego z ok. 95% w CEM I do poziomu 25%÷45%]. Stosowanie cementu hutniczego CEM III/A,B w składzie betonu jest także drogą do



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie cementu z 70% udziałem GGBFS o zmiennym współczynniku w/c

Fig. 6. Compressive strength of cements with 70% quantity of GGBFS with a variable w/c ratio

a significant reduction in early strength, especially with a 70 % GGBFS content in the cement composition.

- A more effective solution in shaping the early strength [after 2 days of maturation] of CEM III/A blast furnace cement containing 50 % GGBFS is to increase the degree of grinding of Portland clinker. Portland clinker is a cement component that is easier to grind compared to GBFS. The  $W_i$  [Work Index] grindability indices using the Bond method for clinker reach values of 13-16 kWh/t, while for granulated blast furnace slag they reach values of 18-22 kWh/t. Milling clinker is therefore more economical in industrial practice [lower grinding costs, higher efficiency of grinding equipment]. Higher clinker grinding degree results in acceleration of silicate phase hydration, and the hydration product  $Ca(OH)_2$  acts as an activator.
- Increasing the surface development of GGBFS from 3800  $cm^2/g$  to 6000  $cm^2/g$  causes a significant increase in the compressive strength of CEM III/A,B blast furnace cement containing both 50 % and 70 % GGBFS starting from the 7th day of maturation [particularly visible for cement containing 70% GGBFS with a specific surface area of 6000  $cm^2/g$ ].
- CEM III/A,B blast furnace cements show a significant increase in strength between the 28th and 90th day of hardening.
- By mechanical activation of GGBFS, CEM III/A,B blast furnace cements with strength class from 32.5N to strength class 52.5N can be obtained with a wide range of possible applications in construction.
- The most effective solution for construction practice is the use of CEM III/A,B blast furnace cements in the composition of concrete with a low water/cement ratio.
- The combination of the synergistic effect resulting from the mechanical activation of GGBFS [grinding] and the reduced w/c ratio from 0.5 to 0.3 allows obtaining cements with compressive strength significantly exceeding the strength of CEM I Portland cement and allows for a significant extension of the scope of use of CEM III/A,B blast furnace cements with a high content of

znacznego obniżenia śladu węglowego betonu oraz elementów i konstrukcji budowlanych.

## Literatura / References

1. W. Matthes, A. Vollpracht, Y. Villagrán, S. Kamali-Bernard, D. Hooton, E. Gruyaert, M. Soutsos, N. De Belie, Ground granulated blast-furnace slag. RILEM State-of-the-Art Reports, 1–53 (2018). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_1).
2. N. Pronina, S. Krüger, H. Bornhöft, J. Deubener, A. Ehrenberg, Cooling history of a wet-granulated blast furnace slag (GBS). *J. Non-Cryst. Solids* **499**, 344–349 (2018). <https://doi.org/10.1016/J.JNONCRY-SOL.2018.07.054>.
3. J. Liu, Q. Yu, Z. Zuo, F. Yang, Z. Han, Q. Qin, Reactivity and performance of dry granulation blast furnace slag cement. *Cem. Concr. Comp.* **95**, 19–24 (2019) <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.10.008>.
4. I. Yuksel, Blast-furnace slag. Waste Supplementary Cementitious Materials in Concrete. (2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00012-2>.
5. Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Szwabowski, J. Śliwiński. Cements with mineral additives in the new generation concrete technology. Górażdże Cement, Silesian Institute Publishing House, (in Polish), Opole (2002).
6. M. Batog, Z. Giergiczny, Influence of mass concrete constituents on its properties. *Constr. Build. Mater.* **146**, 221–230 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.085>
7. W. Kurdowski, Chemistry of cement and concrete. Cement Producers Association, (in Polish). Kraków (2010).
8. I. Wilińska, B. Pacewska, Influence of selected activating methods on hydration processes of mixtures containing high and very high amount of fly ash. *J. Therm. Anal. Calor.* **133**, 823–843 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10973-017>.
9. Y. Jeong, H. Park, Y. Jun, J.H. Jeong, J.E. Oh, Influence of slag characteristics on strength development and reaction products in a CaO-activated slag system. *Cem. Concr. Comp.* **72**, 155–167 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2016.06.005>.
10. Y. Jeong, J.E. Oh, Y. Jun, J. Park, J. Ha, S.G. Sohn, Influence of four additional activators on hydrated-lime [Ca(OH)<sub>2</sub>] activated ground granulated blast-furnace slag. *Cem. Concr. Comp.* **65**, 1–10 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2015.10.007>.
11. J. Kempl, O. Çopuroğlu, EH-pH- and main element analyses of Blast Furnace Slag Cement paste pore solutions activated with sodium monofluorophosphate – implications for carbonation and self-healing. *Cem. Concr. Comp.* **71**, 63–76 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2016.05.004>.
12. M. Şahin, M. Mahyar, S.T. Erdoğan, Mutual activation of blast furnace slag and a high-calcium fly ash rich in free lime and sulfates. *Constr. Build. Mater.* **126**, 466–475 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD-MAT.2016.09.064>.
13. Z. Osmanovic, N. Haračić, J. Zelić, Properties of blastfurnace cements (CEM III/A, B, C) based on Portland cement clinker, blastfurnace slag and cement kiln dusts. *Cem. Concr. Comp.* **91**, 189–197 (2018), <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.05.006>.
14. Z. Giergiczny, Fly ash and slag. *Cem. Concr. Res.* **124F**, 105826, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105826>.
15. R. Bujak, The influence of grinding conditions on the chemical activity of granulated blast furnace slag and the properties of slag binders. Doctoral dissertation. AGH University of Science and Technology in Cracow, WIMiC, (in Polish), (Cracow 2022).

GGBFS [50 %÷70 %] in the composition of high-strength concretes, as well as in the composition of prefabricated elements.

- CEM III blast furnace cements are low-emission cements compared to the emission of CEM I Portland cement [limiting the content of Portland clinker from approx. 95 % in CEM I to the level of 25 %÷45 %]. The use of CEM III/A,B blast furnace cement in the composition of concrete is also a way to significantly reduce the carbon footprint of concrete and building elements and structures.

16. Z. Giergiczny, Contemporary slag cements in construction. Rheology in concrete technology - XVI Scientific and Technical Conference, (in Polish) Belchatow (2015).
17. A. Garbacik, S. Chłędzyński, Compound cements in construction. Wydawnictwo Polski Cement, (in Polish), Cracow (2008).
18. PN-EN 206+A2:2021-08: Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
19. ISO 29581-2:2010 Cement. Test methods. Part 2: Chemical analysis by X-ray fluorescence.
20. PN-EN 196-2:2013-11 Methods of testing cement. Part 2: Chemical analysis of cement.
21. PN-EN 197-1:2012 Cement. Part 1: Composition, requirements and conformity criteria for common cements.
22. PN-EN 15167-1:2007 Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria.
23. PN-EN 196-1:2016- 07 Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength
24. PN-EN 196-3+A1:2011 Methods of test for cement. Part 3: Determination of setting times and volume stability.
25. PN-EN 1015-3:2000/A1:2005 Methods of testing mortars for masonry. Determination of the consistency of fresh mortar (using a flow table).