

*Wioletta Jackiewicz-Rek  
Justyna Kuziak  
Tomasz Legierski  
Tomasz Drzymała  
Konrad Grzesiak*

# **Właściwości wytrzymałościowe betonu ekspandowanego proszkiem aluminiowym**

STRENGTH PROPERTIES OF CONCRETE EXPANDED WITH ALUMINUM  
POWDER

## **Streszczenie**

Przeprowadzono badania wytrzymałościowe betonów wykonanych z dwóch rodzajów cementu: cementu portlandzkiego CEM I i cementu, hutniczego CEM III z domieszką z proszkiem aluminiowym w ilości 0,5; 1 i 1,5% masy cementu, powodującą ekspansję betonu. Stwierdzono obniżenie wytrzymałości na ściskanie betonu z CEM I po wprowadzeniu domieszki w ilości powyżej 0,5% oraz obniżenie wytrzymałości na ściskanie betonu z CEM III po dodaniu domieszki w całym zakresie stosowanych dozowań. Domieszka ekspansywna nie wpływa znacząco na wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu betonu z cementem CEM I. W przypadku betonu z cementu hutniczego dodanie domieszki ekspansywnej powodowało nieznaczne zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

## **Abstract**

The research has covered evaluation of the strength concrete properties of concretes made of two types of cement: Portland Cement CEM I and Blast Furnace Slag Cement CEM III with admixture with aluminum powder in the amount of 0.5; 1 and 1.5% of cement mass causing expansion of concrete. It was found that the compressive strength of concrete with CEM I was reduced after introducing the admixture in the amount above 0.5% and lowering the compressive strength of concrete with CEM III after addition of admixture in

---

*dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek – Politechnika Warszawska*

*dr inż. Justyna Kuziak – Politechnika Warszawska*

*inż. Tomasz Legierski – Politechnika Warszawska*

*dr inż. Tomasz Drzymała – Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie*

*inż. Konrad Grzesiak – BASF Polska*

the entire range of dosages used. The expansive admixture does not significantly affect the tensile splitting strength of concrete with CEM I. In the case of concrete with CEM III, the addition of an expansive admixture caused a slight decrease in the tensile splitting strength.

## 1. Wstęp

Beton ekspansywny tradycyjnie wytwarzany jest przy zastosowaniu cementów ekspansywnych zawierających składniki, które podczas hydratacji cementu krystalizują ze zwiększeniem objętości [1, 2]. Cementy ekspansywne jako czynnik ekspansywny zawierają siarczan wapnia (zwiększona zawartość w stosunku do cementów „nieekspansywnych”) i kompleks Kleina (spiek  $C_4A_3\bar{S}$ ) lub cement glinowy, lub zwiększoną zawartość  $C_3A$ . ASTM C845 – 96 [3] rozróżnia trzy rodzaje cementów ekspansywnych:

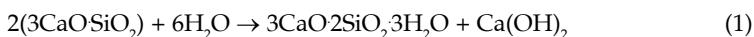
- 1) cement ekspansywny (K) zawierający  $C_4A_3\bar{S}$ , siarczan wapnia i wolny tlenek wapnia,
- 2) cement ekspansywny (M) zawierający cement glinowy i siarczan wapnia,
- 3) cement ekspansywny (S) zawierający  $C_3A$  i siarczan wapnia.

Podczas wiązania takich cementów powstaje większa ilość etryngitu, który krystalizuje ze zwiększeniem objętości powodując wzrost objętości betonu.

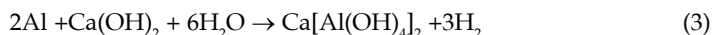
Innym sposobem wywołania ekspansji betonu jest stosowanie tlenku wapnia i tlenku magnezu, które podczas wiązania cementu tworzą portlandyt i brucyt, które również krystalizują ze wzrostem objętości.

Podczas dojrzewania betonów, wykonanych z cementów ekspansywnych lub zawierających tlenki wapnia i magnezu, następuje wzrost objętości, a także ekspansja do wewnątrz, co powoduje polepszenie szeregu cech betonu: m.in. wzrost szczelności, mrozoodporności, wytrzymałości i odporności na agresję siarczanową [1].

Ekspansję mieszanki betonowej można także uzyskać dodając proszek aluminiowy. Proszek aluminiowy jest wykorzystywany m.in. do: napowietrzania betonu, produkcji betonu lekkiego, produkcji betonu komórkowego, do wytwarzania betonów do iniekcji kanałów kablowych oraz betonów do betonowania otworów wiertniczych w przemyśle naftowym [4, 5]. Proszek aluminiowy może być wykorzystany do produkcji betonów ekspansywnych, do efektywnego wypełniania trudnodostępnych miejsc, takich jak szczeliny czy ubytki, a także do produkcji betonów o ograniczonym skurczu w celu zapobiegania zarysowaniom. Działanie proszku aluminiowego związane jest z obecnym w zaczynie cementowym wodorotlenkiem wapnia powstającym w reakcji krzemianów wapnia z wodą podczas wiązania cementu (1) [6]:



Aluminium reaguje z wodorotlenkiem wapnia z wytworzeniem gazowego wodoru (2,3) [7]:



W temperaturze 20°C z 1 kg aluminium można uzyskać ok 1,3 m<sup>3</sup> wodoru, więc jest to skuteczny środek gazotwórczy. Pod wpływem ciśnienia wywieranego przez wytwarzający się gaz następuje wzrost objętości mieszanki betonowej. Efekt ekspansji betonu zależy m.in. od ilości proszku aluminiowego, temperatury świeżej mieszanki i zawartości alkaliów w cemencie [8]. Proszek aluminiowy stosuje się w niewielkich ilościach, np. przy produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego jest on dodawany w ilości 0,2% masy cementu [4]. W przypadku cementów o małej zawartości alkaliów zaleca się dodanie wodorotlenku sodu lub wapna, żeby zapewnić odpowiednią ilość jonów OH<sup>-</sup> do reakcji z aluminium [8].

Dodanie proszku aluminiowego do mieszanki betonowej powoduje wzrost porowatości betonu oraz obniżenie jego gęstości i wytrzymałości [9].

Celem niniejszej pracy była ocena wpływu domieszki ekspansywnej zawierającej proszek aluminiowy na cechy wytrzymałościowe betonu.

## 2. Przedmiot i zakres przeprowadzonych badań

Przedmiotem badań były betony wykonane przy użyciu cementu portlandzkiego (CEM I) oraz cementu hutniczego (CEM III) różniące się jedynie zawartością domieszki zawierającej proszek aluminiowy (0%; 0,5%; 1%; 1,5% masy cementu). Zakres przeprowadzonych badań obejmował badanie wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu.

### 2.1. Metodyka badań

Badania wytrzymałościowe betonu przeprowadzono każdorazowo na 3 próbkach o wymiarach 150x150x150 mm, przygotowanych według PN-EN 12390-1:2001 [10]. Do momentu badania próbki dojrzewały w komorze klimatycznej, zgodnie z PN-EN 12390-2 [11]. Badania wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej CONTROLS MCC 8, zgodnej z normą PN-EN 12390-4:2001 [12]. Wytrzymałość na ściskanie oznaczono po 2, 7, 28 oraz 90 dniach od zaformowania, zgodnie z PN-EN12390-3:2011 [13]. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono zgodnie z PN-EN12390-6:2011 [14] po 28 dniach dojrzewania betonu. Bezpośrednio przed badaniem wytrzymałości, próbki zmierzono i zważono w celu obliczenia gęstości betonu.

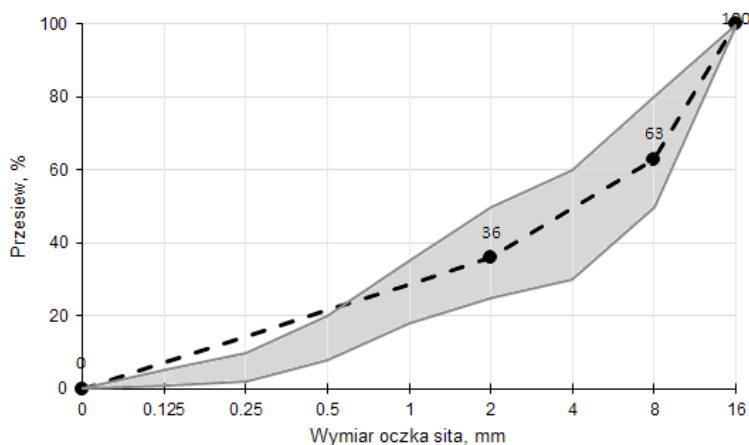
### 2.2. Materiały zastosowane do badań i ich charakterystyka

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano 2 rodzaje cementów: cement portlandzki CEM I 42,5 R oraz cement hutniczy CEM III/A 42,5N LH HSR NA, zgodnych z normą PN-EN 197-1:2012 [15]. W tabeli 1 przedstawiono wybrane parametry fizykochemiczne stosowanych cementów udostępnione przez producentów.

Tabela 1. Parametry fizykochemiczne cementu portlandzkiego i hutniczego wg. danych producentów

Dana cecha fizykochemiczna	CEM I 42,5 R	CEM III 42,5N LH HSR NA
Początek czasu wiązania [min]	184	216
Koniec czasu wiązania [min]	242	292
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
– po 2 dniach	30,1	15,2
– po 28 dniach	60,2	58,8
Zawartość SO <sub>3</sub> [%]	2,95	2,32
Zawartość Cl [%]	0,089	0,08
Straty prażenia [%]	3,33	1,00
Zmiana objętości [mm]	1	brak informacji

Do przygotowania mieszanek betonowych wykorzystano piasek wiślany frakcji 0/2 oraz kruszywo grube – żwir płukany frakcji 2/16 zgodne z PN-EN 12620+A1:2010 [16]; krzywą uziarnienia stosowanego kruszywa zamieszczono na rysunku 1.



Rys. 1. Kompozycja kruszywa do betonu ( $D_{max} = 16$  mm) w obszarze dobrego uziarnienia kruszywa

Do przygotowania mieszanki betonowej użyto wody wodociągowej, która spełnia wymagania PN-EN 1008:2004 [17]. Stosowano domieszkę upłynniającą zgodną z PN-EN 934-2:2010 [18] w celu uzyskania założonej konsystencji mieszanki betonowej. Aby wywołać ekspansję betonu użyto domieszki, zawierającej aluminium w postaci proszku, spełniającej wymagania EN 934-4 [19]. Domieszkę tę nazwano dalej domieszką ekspansywną ze względu na powszechne określanie w ten sposób domieszek powodujących ekspansję betonu, mimo że określenie to nie jest trafne, bo sama domieszka nie ulega ekspansji. Trafniejszym określeniem byłoby domieszka spęczniająca lub domieszka poryzująca. W tabeli 2 przedstawiono wybrane parametry zastosowanych domieszek.

Tabela 2. Właściwości stosowanych domieszek

Właściwości	Domieszka upłynniająca	Domieszka ekspansywna
Surowiec podstawowy	eter polikarboksylowy	proszek aluminiowy, plastyfikator
Forma	ciecz	proszek
Kolor	żółtawy	jasno brązowy
Gęstość (w $T = 20^{\circ}\text{C}$ )	$1,05 \pm 0,02$ g/cm <sup>3</sup>	0,92 kg/cm <sup>3</sup>
Wartość pH (w $T = 20^{\circ}\text{C}$ )	5,5 1,0	-
Zawartość chlorków	$\leq 0,1\%$ masy	$\leq 0,1\%$ masy
Zawartość alkaliów	$\leq 1,0\%$ masy	-

### 2.3. Przedmiot badań

Zaprojektowano 4 składy betonu z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R oraz 4 składy z cementem hutniczym CEM III/A 42,5N LH HSR NA z różną zawartością domieszki ekspansywnej. Domieszkę ekspansywną mieszano z cementem. Do każdej mieszanki zastosowano domieszkę upłynniającą w ilości 1% masy cementu. Współczynnik wodno-cementowy w/c wszystkich betonów wynosił 0,37. Składy zaprojektowanych betonów przedstawiono w tabeli 3. Próbkę do badań każdego rodzaju betonu wykonano z objętości jednego zarobu, która wynosiła 85 dm<sup>3</sup>.

Tabela 3. Składy zaprojektowanych betonów na 1 m<sup>3</sup>

Rodzaj składnika	Składy mieszanek na 1 m <sup>3</sup> [kg]							
	CEM I (0%)	CEM I (0,5%)	CEM I (1%)	CEM I (1,5%)	CEM III (0%)	CEM III (0,5%)	CEM III (1%)	CEM III (1,5%)
Cement	380 CEM I				380 CEM III			
Domieszka ekspansywna	0	1,8	3,6	5,4	0	1,8	3,6	5,4
Domieszka upłynniająca	3,6							
Woda	142							
Piasek 0/2	698							
Żwir 2/8	524							
Żwir 8/16	718							

### 3. Wpływ domieszki z proszkiem aluminiowym na ekspansję mieszanki betonowej

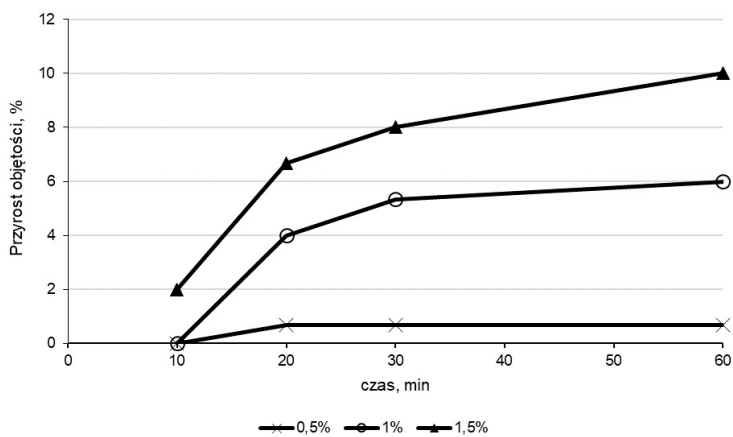
Badanie przyrostu objętości mieszanki betonowej polegało na pomiarze ekspansji w czasie do 1 godziny po 10, 20, 30 oraz 60 minutach od momentu kontaktu cementu z wodą. Oznaczenia przeprowadzono na 3 próbkach sześciennych o boku 15 cm zaformowanych z każdego składu, w stalowych formach, gdzie tylko jedna powierzchnia (górną) mogła swobodnie się odkształcać (fot. 1).

Przy produkcji betonu ekspansywnego, szczególnie betonu towarowego, należy mieć na uwadze początek możliwej ekspansji i ogólnie zmiany objętości betonu w czasie od momentu kontaktu cementu z wodą i domieszką ekspansywną (rys. 2). Jak dowiedziono nie bez znaczenia jest skład spoiwa i czas oraz tempo zmian pH mieszanki i betonu. Dlatego też na etapie projektowania betonu należy sprawdzić kiedy i jak szybko będzie następowała ekspansja mieszanki.

W zależności od zawartości domieszki z proszkiem aluminiowym inaczej przebiegał wzrost objętości próbek sześciennych o boku 15 cm wykonanych z cementem portlandzkim i hutniczym, przy czym przyrost wysokości próbek z CEM I był dużo szybszy niż próbek z CEM III. Przeprowadzone badania potwierdziły, że stosowanie domieszki ekspansywnej w ilości 0,5% masy cementu jest nieskuteczne w celu uzyskania betonu ekspansywnego. Szczególnie dotyczy to betonów z cementem portlandzkim.



Fot. 1. Ekspansja próbek betonowych po 60 minutach od kontaktu cementu z wodą



Rys. 2. Wzrost objętości próbek betonowych z CEM I i różną zawartością domieszki ekspansyjnej w czasie do 60 minut od kontaktu cementu z wodą

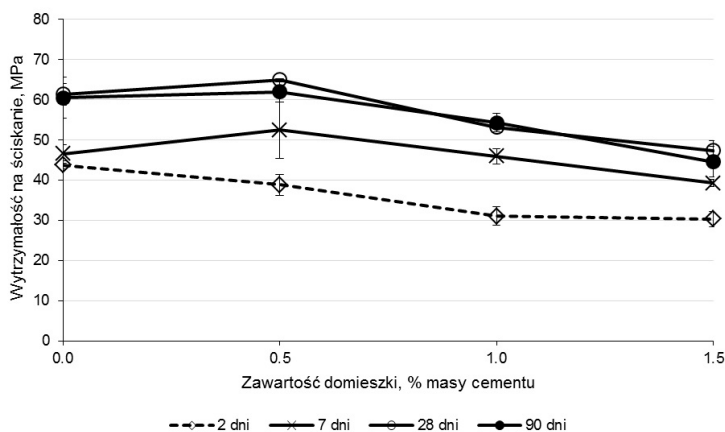
## 4. Wpływ domieszki z proszkiem aluminiowym na wytrzymałość na ściskanie betonu

Zarówno w przypadku betonu z CEM I, jak i CEM III obserwowano wyraźny wzrost wytrzymałości na ściskanie do 28 dniach dojrzewania (rys. 3, 4). Po tym czasie przyrost wytrzymałości na ściskanie był niewielki. Wytrzymałości betonów na ściskanie po 28 i 90 dniach były zbliżone do siebie.

Dodanie domieszki ekspansywnej w ilości 0,5% masy cementu do betonu z cementem CEM I nie wpływa znacząco na wytrzymałość na ściskanie betonu (rys. 5). Przez cały czas trwania badań otrzymywane wytrzymałości próbek CEM I (0,5%) były zbliżone do wytrzymałości próbek bez domieszki. Jedynie po 2 dniach dojrzewania domieszka ekspansywna w tak niewielkiej ilości spowodowała ok 11% spadek wytrzymałości na ściskanie. Dalsze zwiększanie dozowania domieszki ekspansywnej skutkowało zmniejszeniem wytrzymałości betonu, we wszystkich terminach badań. Po 28 dniach zarejestrowano obniżenie wytrzymałości na ściskanie o ok. 13% i 23% dla próbek zawierających domieszkę w ilości, odpowiednio, 1 i 1,5% masy cementu CEM I. Otrzymane wyniki odpowiadają zmniejszeniu klasy wytrzymałości z C50/60 betonu odniesienia do C35/45 betonu zawierającego 1,5% masy cementu domieszki ekspansywnej (tabela 4).

Tabela 4. Klasy wytrzymałości na ściskanie wykonanych betonów wg PN-EN 206 [20]

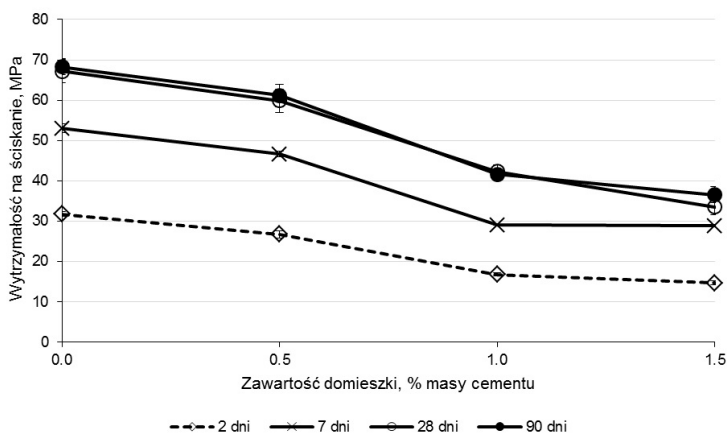
Zawartość domieszki ekspansywnej, % m.c.	Klasa wytrzymałości betonu z domieszką ekspansywną	
	CEM I	CEM III
0	C50/60	C55/67
0,5	C55/67	C50/60
1	C45/55	C35/45
1,5	C35/45	C25/30



Rys. 3. Wpływ domieszki zawierającej proszek aluminiowy na wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego z cementu CEM I



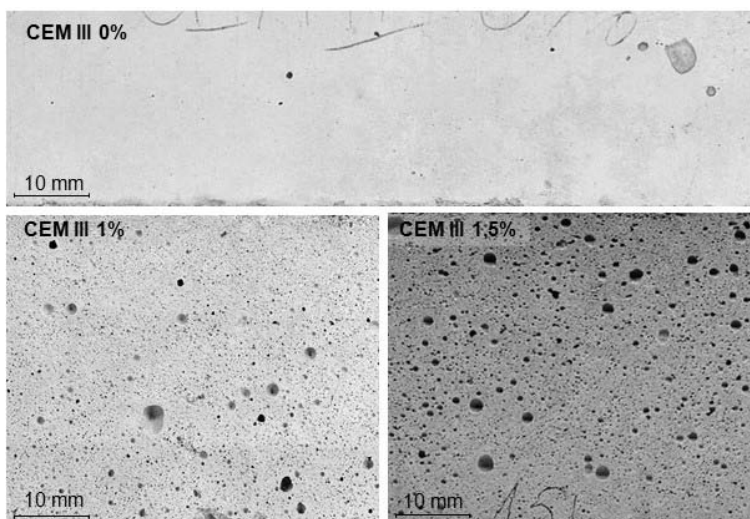
W przypadku cementu CEM III dodanie domieszki ekspansywnej nawet w najmniejszej stosowanej ilości (0,5%) spowodowało obniżenie wytrzymałości na ściskanie betonu (rys. 4). Dalsze zwiększanie ilości domieszki spowodowało dalszy spadek wytrzymałości na ściskanie. Po 28 dniach dojrzewania wytrzymałość na ściskanie zmniejszyła się o ok. 11, 37 i aż 50% po dodaniu domieszki w ilości odpowiednio 0,5, 1 i 1,5% masy cementu. Po wprowadzeniu domieszki w ilości 1,5% masy cementu CEM III klasa wytrzymałości zmniejszyła się z C55/67 (próbki bez domieszki) aż do C25/30 (tabela 4). Domieszka ekspansywna znacznie bardziej obniża wytrzymałość betonu z CEM III niż z CEM I.



Rys. 4. Wpływ domieszki zawierającej proszek aluminiowy na wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego z cementu CEM III

Obniżenie wytrzymałości betonów po dodaniu domieszki ekspansywnej jest zgodne z doniesieniami literaturowymi [9]. Zjawisko to jest związane z wydzielaniem w mieszance betonowej gazowego wodoru, na skutek czego zwiększa się porowatość betonu. Zwiększenie porowatości betonu można było stwierdzić nawet obserwując powierzchnię wykonanych próbek. Próbki betonu bez domieszki miały gładką powierzchnię z niewielką ilością porów wynikającą ze stopnia zagęszczenia próbki (fot. 2). Po dodaniu domieszki w ilości 0,5% masy cementu nie obserwowano znaczących zmian stanu powierzchni próbek. Natomiast w przypadku betonów zawierających domieszkę ekspansywną w ilości 1 i 1,5% masy cementu obserwowano dużą ilość niewielkich porów rozłożonych równomiernie na powierzchni betonów (fot. 2).

Na zwiększenie porowatości, na skutek zastosowania domieszki ekspansywnej wskazywały także wyniki badań nasiąkliwości (tabela 5). Wzrost porowatości wraz ze wzrostem zawartości domieszki był prawdopodobnie większy niż wzrost nasiąkliwości, ze względu na dużą liczbę zamkniętych kulistych porów wytworzonych w betonach z domieszką.

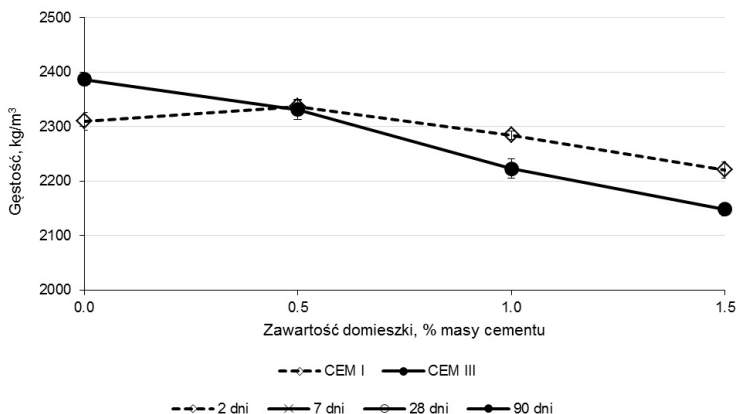


Fot. 2 Powierzchnia betonu z cementem CEM III bez domieszki i z domieszką ekspansywną dodaną w ilości 1 i 1,5% masy cementu

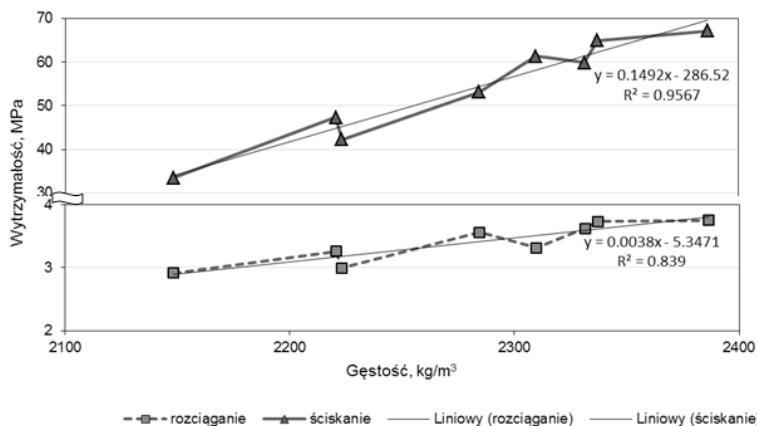
Tabela 5. Wyniki badań nasiąkliwości betonów z proszkiem aluminiowym

Zawartość domieszki ekspansywnej, % m.c.	Nasiąkliwość, %	
	CEM I	CEM III
0	3,6 ± 0,2	3,6 ± 0,1
0,5	3,8 ± 0,1	3,8 ± 0,0
1	3,9 ± 0,1	4,0 ± 0,2
1,5	4,0 ± 0,1	4,2 ± 0,0

W związku ze zwiększoną porowatością próbek z domieszką ekspansywną, obserwowano zmniejszenie gęstości objętościowej betonu wraz ze zwiększeniem zawartości domieszki ekspansywnej (rys. 5). Wyjątkiem był beton CEM I (0,5%), którego gęstość była zbliżona do gęstości betonu z CEM I bez domieszki. Wyniki badań wytrzymałości korelują z wartościami gęstości betonu. Otrzymano liniową zależność wytrzymałości na ściskanie betonu od jego gęstości (rys. 6) o współczynniku determinacji  $R^2 = 0,96$  świadczącym o dobrym dopasowaniu wyników badań do zależności liniowej.



Rys. 5. Wpływ domieszki ekspansywnej na gęstość objętościową betonu wykonanego z cementu CEM I i CEM III

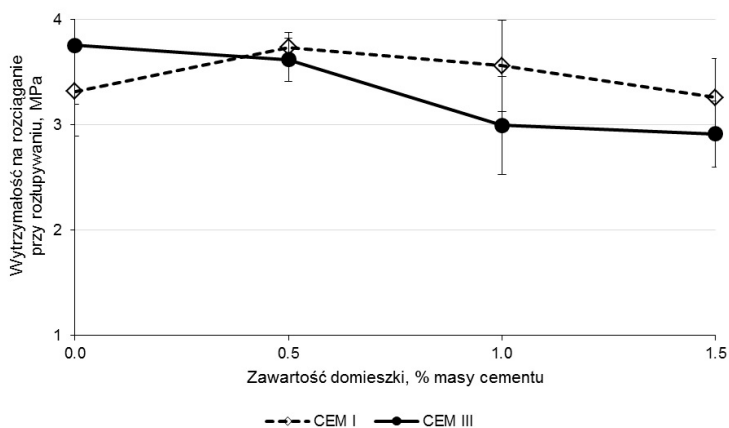


Rys. 6. Zależność wytrzymałości betonu ekspansywnego od gęstości objętościowej betonu

## 5. Wpływ domieszki z proszkiem aluminiowym na wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu z obu badanych cementów bez domieszki i z domieszką w ilości 1 i 1,5% masy cementu charakteryzują się znacznymi odchyleniami standardowymi (rys. 7) ze względu na niejednorodność betonu spowodowaną wydzielaniem się gazowego wodoru z mieszanki. Współczynnik zmienności dla tych próbek waha się od 11 do 15%. Jedynie dla próbek zawierających domieszkę ekspansywną w ilości 0,5% masy cementu odchylenia standardowe uzyskanych wyników są niewielkie (współczynnik zmienności ok. 5%). W przypadku cementu

CEM I nie zaobserwowano wyraźnej tendencji zmian wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wraz ze zwiększaniem ilości domieszki ekspansywnej (rys. 7). Wprowadzenie domieszki ekspansywnej do betonu z cementem CEM III spowodowało niewielkie zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Obserwowano niewielkie zmniejszanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wraz ze zwiększaniem dozowania domieszki ekspansywnej. Wytrzymałość na rozciąganie w znacznie mniejszym stopniu zależy od gęstości betonu niż wytrzymałość na ściskanie (rys. 6). Dopasowanie liniowe do uzyskanej zależności wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu od gęstości charakteryzuje się współczynnikiem determinacji  $R^2$  wynoszącym tylko 0,84, co świadczy o średniej korelacji.



Rys. 7. Wyniki wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach dojrzewania w zależności od ilości zastosowanej domieszki ekspansywnej

## 6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu domieszki ekspansywnej zawierającej proszek aluminiowy na uzyskiwane właściwości wytrzymałościowe betonu można sformułować następujące wnioski:

- dodanie domieszki ekspansywnej w ilości 0,5% cementu CEM I nie wpływa znacząco na żadną z badanych cech betonu (gęstość objętościowa, cechy wytrzymałościowe betonu), nie powoduje też znaczącej ekspansji mieszanki betonowej.
- zwiększenie ilości domieszki ekspansywnej powyżej 0,5% masy cementu CEM I powoduje zmniejszenie gęstości betonu oraz zmniejszenie wytrzymałości betonu na ściskanie.

Po 28 dniach wytrzymałości na ściskanie betonów zawierających domieszkę w ilości 1 i 1,5% masy cementu CEM I zmniejszyły się odpowiednio o ok. 13% i 23%. Otrzymane wyniki odpowiadają zmniejszeniu klasy wytrzymałości z C50/60 betonu odniesienia do C35/45 betonu zawierającego 1,5% masy cementu domieszki ekspansywnej.

- nie zaobserwowano wyraźnej tendencji zmian wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu z CEM I wraz ze zwiększaniem ilości domieszki ekspansywnej

- wzrost ilości domieszki ekspansywnej powoduje zwiększenie porowatości oraz zmniejszenie gęstości objętościowej próbek betonu z cementu CEM III w całym badanym zakresie dozowań domieszki.
- wytrzymałość na ściskanie betonu z CEM III maleje wraz ze wzrostem ilości domieszki ekspansywnej w składzie betonu.

Procentowy spadek wytrzymałości betonu na ściskanie w stosunku do betonu porównawczego nie zawierającego domieszki wynosi odpowiednio 11% (dla 0,5% domieszki ekspansywnej), 37% (dla 1% domieszki ekspansywnej) oraz 50% (dla 1,5% domieszki ekspansywnej). Po wprowadzeniu domieszki w ilości 1,5% masy cementu CEM III klasa wytrzymałości zmniejszyła się z C55/67 (próbki bez domieszki) aż do C25/30.
- zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu z CEM I na skutek działania domieszki ekspansywnej jest mniejsze niż w przypadku betonu z cementem hutniczym, ze względu na wolniejszą dynamikę wydzielania wodoru w betonie z CEM III.

## Literatura

- [1] Król M., Tur W., Beton ekspansywny, Arkady, Warszawa 1999
- [2] Trębaczkiwicz P., Winch M., Spoiwa na bazie cementu ekspansywnego, Górnictwo i Geoinżynieria 3 (2007) 441
- [3] ASTM C845 – 96 Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement
- [4] Neville A.M. Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000
- [5] <https://www.google.com/patents/US4565578>
- [6] Kurdowski W. Chemia cementu i betonu, Polski Cement, PWN, Kraków 2010
- [7] Fazhou Wang Ć Zhichao Liu Ć Shuguang Hu Early age volume change of cement asphalt mortar in the presence of aluminum powder, Materials and Structures (2010) 43:493–498
- [8] N.NarayananK.Ramamurthy Structure and properties of aerated concrete: a review, Cement and Concrete Composites Volume 22, Issue 5, 2000, Pages 321-329 [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0)
- [9] Phaiboon Panyakapo Mallika Panyakapo Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete Waste Management Volume 28, Issue 9, 2008, Pages 1581-1588 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.006>
- [10] PN-EN 12390-1:2013 „Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form”
- [11] PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [12] PN-EN 12390-4:2001 „Badania betonu – Część 4: Wytrzymałość na ściskanie – Wymagania dla maszyny wytrzymałościowych”
- [13] PN-EN12390-3:2011 „Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”
- [14] PN-EN12390-6:2011 „Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań”
- [15] PN-EN 197-1:2012: „Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”
- [16] PN-EN 12620+A1:2010 „Kruszywa do betonu”
- [17] PN-EN 1008:2004 „Woda zarobowa do betonu”
- [18] PN-EN 934-2:2010 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie”
- [19] EN 934-4:2009 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 4: Domieszki do zaczynów iniekcyjnych do kanałów kablowych. Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie”
- [20] PN-EN 206+A1:2016-12 „Beton: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”

