

# WPLYW DOMIESZEK PRZECIWMROZOWYCH I KLASY CEMENTU NA WYTRZYMAŁOŚĆ ZAPRAW CEMENTOWYCH

Valeriy EZERSKIY, Małgorzata LELUSZ\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W prezentowanym artykule przedstawiono wyniki badania laboratoryjnego wpływu wybranych domieszek przeciwmrozowych na wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych dojrzewających w obniżonych temperaturach. Badanie przeprowadzono zgodnie z zasadami planowania eksperymentu. Na podstawie otrzymanych wyników opracowano model matematyczny zależności wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  ( $Y$ ) próbek zaprawy cementowej od rodzaju domieszki przeciwmrozowej (czynnik  $X1$ ), ilości domieszki przeciwmrozowej (czynnik  $X2$ ), klasy wytrzymałości cementu (czynnik  $X3$ ) oraz temperatury dojrzewania (czynnik  $X4$ ). Wyniki badania mogą stanowić podstawową informację dla projektantów i wykonawców decydujących się na wykonywanie robót budowlanych w okresie zimowym.

*Słowa kluczowe:* domieszki przeciwmrozowe, wytrzymałość na ściskanie, betonowanie w obniżonych temperaturach.

## 1. Wprowadzenie

Właściwa pielęgnacja betonu i stosowanie domieszek przeciwmrozowych pozwala na prowadzenie robót budowlanych nieprzerwanie w okresie zimowym.

Powszechnie wiadomo (Neville, 2000; Woyciechowski i in., 2002; Jasiczak, 2003), że temperatura dojrzewania kompozytów cementowych powinna mieścić się w granicach 15-20°C. Przy temperaturach niższych następuje spowolnienie procesu wiązania cementu. Poniżej 0°C proces twardnienia praktycznie zanika. W mieszance betonowej, która zamarza bezpośrednio po ułożeniu w deskowaniu, nie rozpocznie się proces wiązania. Po ustąpieniu ujemnych temperatur mieszankę betonową należy ponownie zagęścić, żeby uzyskać beton bez spadku wytrzymałości. W przypadku braku ponownego zagęszczenia mieszanki w betonie pojawiają się pory z powodu topnienia zamrożonej wody, która ma mniejszą objętość niż lód.

Zgodnie z Instrukcją ITB nr 282 (1995) za tak zwany okres robót budowlano-montażowych w warunkach zimowych przyjmuje się umownie czas od 15 października do 15 kwietnia. Przed nastaniem tego okresu powinny być zakończone przygotowania do robót zimowych i wykonany projekt prowadzenia robót w obniżonych temperaturach (Bajorek, 2007).

Metody, które umożliwiają roboty w obniżonych temperaturach są następujące (Jasiczak, 2003):

- metody umożliwiające tęzenie betonu bez dostarczania ciepła z zewnątrz,
- metody wymagające dostarczania ciepła z zewnątrz,
- kombinacja tych metod.

Zalecenia dotyczące pielęgnacji betonu w okresie zimowym i dokładny opis tych metod podano między innymi w publikacjach (Woyciechowski i in., 2002; Jasiczak, 2003).

Pielęgnacja betonu w warunkach obniżonych temperatur polega przede wszystkim na ochronie przed zamarzaniem przez co najmniej 24 godziny. Nie powinno się również stosować intensywnej pielęgnacji na mokro, żeby nie dopuścić do całkowitego nasycenia betonu wodą (Neville, 2000). W temperaturze poniżej +10°C nie ma niebezpieczeństwa nadmiernego wysychania betonu. Alternatywą dla tych zabiegów może być stosowanie domieszek przeciwmrozowych, które obniżają temperaturę krzepnięcia wody poniżej 0°C, przyspieszają wiązanie cementu i podnoszą temperaturę hydratacji.

Domieszki przeciwmrozowe nie są jedynym i wystarczającym zabiegiem chroniącym beton dojrzewający w warunkach obniżonych temperatur. Jeżeli w warunkach bardzo surowej zimy będzie się stosować tylko domieszki przeciwmrozowe, może to doprowadzić do poważnych problemów lub nawet katastrof (Bajorek, 2009; Błaszczczyński i in., 2004). Pomimo stosowania domieszki z dołączoną informacją o możliwości prowadzenia robót w temperaturze -10°C, należy pamiętać o konieczności przestrzegania zasad wykonywania robót betonowych zgodnie z Instrukcją ITB nr 282 (1995). Instrukcja ta nakazuje ochronę świeżo wbudowanego betonu przed zamrożeniem, aż do uzyskania tzw. wytrzymałości bezpiecznej. Badania wykazały (Bajorek, 2009), że zastosowanie domieszek, nawet w ilościach maksymalnych wskazanych przez producenta, wpływa na obniżenie temperatury zamarzania

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.lelus@pb.edu.pl

mieszanki betonowej mało istotnie – obniża zaledwie do kilku dziesiątych stopnia poniżej zera.

Podjęcie prac w okresie zimowym i zaniedbanie pielęgnacji może spowodować nieodwracalne uszkodzenia w strukturze betonu. Roboty betonowe i murowe wykonywane w warunkach zimowych wymagają wykonania projektu prowadzenia robót w obniżonych temperaturach, stosowania domieszek chemicznych do betonów i zapraw oraz pielęgnacji z zastosowaniem metod termicznych. Należy więc każdorazowo rozważyć, czy w strefie klimatycznej Polski bardziej opłacalne jest inwestowanie w kosztowną ochronę czy czekanie na ocieplenie (Bajorek, 2007).

Celem pracy jest weryfikacja wpływu wybranych domieszek przeciwmrozowych na wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych dojrzewających w obniżonych temperaturach na podstawie wyników badania zapraw cementowych, wykonywanych z cementów o różnej klasie wytrzymałości i z zastosowaniem różnych domieszek przeciwmrozowych oraz dojrzewających w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  i  $+20^{\circ}\text{C}$ .

## 2. Sformułowanie problemu i wybór planu eksperymentu badawczego

Domieszki przeciwmrozowe są produktami umożliwiającymi przebieg reakcji cementu z wodą w temperaturach ujemnych (Łukowski, 2003). Domieszki przeciwmrozowe umożliwiają betonowanie w warunkach zimowych poprzez:

- obniżenie temperatury zamarzania wody w mieszance betonowej,
- przyspieszenie hydratacji cementu i wydzielanie ciepła hydratacji,
- obniżenie ilości wody zarobowej.

Na wytrzymałość kompozytów cementowych wpływ ma wiele czynników (Neville, 2000) zarówno wewnętrznych, związanych ze składem (receptura mieszanki, jakość składników) jak i zewnętrznych, do których można zaliczyć sposób mieszania składników, metodę formowania oraz pielęgnację zaprawy lub betonu.

Zgodnie z przyjętym celem pracy wytrzymałość zapraw cementowych  $f_c$  w MPa (odpowiedź  $Y$ ) postanowiono zbadać w zależności od: przyjętego rodzaju domieszki przeciwmrozowej (czynnik  $X_1$ ), ilości domieszki przeciwmrozowej w stosunku do masy cementu  $d/c$  (czynnik  $X_2$ ), klasy wytrzymałości cementu (czynnik  $X_3$ ) oraz temperatury dojrzewania  $t$  w  $^{\circ}\text{C}$  (czynnik  $X_4$ ). Prawdopodobnie wybrane czynniki nie wyczerpują wszystkich źródeł zmienności. Jednakże z uwzględnieniem spodziewanych wyników została postawiona teza o możliwości istotnego wpływu wyżej wymienionych czynników na zmienną wyjściową  $Y$ .

Badanie przeprowadzono zgodnie z zasadami

planowania eksperymentu. Według tych zasad najpierw przeprowadzono wybór zakresów zmienności oraz poziomów czynników. Spośród rozpatrywanych czynników dwa okazały się ilościowymi ( $X_2$ ,  $X_4$ ) i dwa jakościowymi ( $X_1$ ,  $X_3$ ). Każdy z czynników rozpatrywano na trzech poziomach. Zakresy zmienności oraz poziomy czynników przedstawiono w tabeli 1.

W planach eksperymentów zamiast naturalnych wartości czynników ilościowych stosuje się wartości unormowane, przejście do których od wartości naturalnych  $\tilde{X}_i$  wykonuje się według zależności:

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \frac{(\tilde{X}_{i\max} + \tilde{X}_{i\min})}{2}}{\frac{\tilde{X}_{i\max} - \tilde{X}_{i\min}}{2}} \quad (1)$$

gdzie  $\tilde{X}_i$ ,  $\tilde{X}_{i\max}$ ,  $\tilde{X}_{i\min}$  oznaczają odpowiednio bieżące, maksymalne i minimalne wartości naturalne  $i$ -tego czynnika.

Poziomy czynników jakościowych zostały wybrane arbitralnie. Dla  $X_1$  na poziomie dolnym ( $-1$ ) wybrano domieszka D1, średnim ( $0$ ) – D2, górnym ( $+1$ ) – D3. Dla  $X_3$  na poziomie dolnym ( $-1$ ) wybrano cement C1, średnim ( $0$ ) – C2, górnym ( $+1$ ) – C3.

Do opisu przestrzeni czynnikowej  $Y_i = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$  została wybrana postać funkcji, której współczynniki należało obliczyć za pomocą metody najmniejszych kwadratów:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{14}X_1X_4 + a_{23}X_2X_3 + a_{24}X_2X_4 + a_{34}X_3X_4 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{44}X_4^2 \quad (2)$$

Przy wyborze planu eksperymentu uwzględniono konieczność uzyskania adekwatnego opisu matematycznego rozpatrywanej funkcji celu i możliwość skrócenia ilości prób. Zastosowano przy tym plan kompozycyjny symetryczny trójpoziomowy dla czterech zmiennych, mający dostateczną efektywność według podstawowych kryteriów statystycznych (Brodskij i in., 1982) oraz zawierający  $N = 24$  próby (tab. 4). W każdej próbie przyjęto powtarne pomiary na sześciu próbkach. Liczba powtórzeń została uzasadniona na podstawie wstępnych badań. Ilość pomiarów w eksperymencie przy sześciokrotnych powtórzeniach każdej próby wynosiła 144.

W celu unikania błędów systematycznych kolejność realizacji pomiarów nie była zgodna z kolejnością układów w planie eksperymentu, lecz była losowa. W taki sposób udało się spełnić jedno z wymagań planowania doświadczeń – randomizację (Krasovskij i Filaretov, 1982).

Tabela 1. Zakresy zmienności rozpatrywanych czynników  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$

Czynniki zmienne	Kod	Jednostka miary	Poziom zmienności		
			-1	0	+1
Rodzaj domieszki	$X_1$	-	D1	D2	D3
Ilość domieszki w stosunku do cementu	$X_2$	-	0,00	0,015	0,030
Rodzaj cementu	$X_3$	-	C1	C2	C3
Temperatura dojrzewania	$X_4$	$^{\circ}\text{C}$	-20	0	+20

### 3. Metoda prowadzenia badania

Przedmiotem badania były stwardniałe zaprawy cementowe o składzie normowym zgodnie z PN-EN 196-1 (2005). Próbkki zapraw dojrzewały przez 28 dni w zróżnicowanych temperaturach zgodnie z planem eksperymentu.

Jako kruszywo drobne zastosowano piasek rzeczny płukany z lokalnej żwirowni. Wyniki analizy sitowej piasku przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki analizy sitowej piasku rzeczno płukanego

Frakcja	Zawartość w %
0/0,125	1,44
0,125/0,25	11,32
0,25/0,5	43,00
0,5/1	29,84
1/2	12,76
2/4	1,64

Do badania stosowano trzy rodzaje cementu portlandzkiego: CEM I 32,5R (C1) i CEM I 42,5R (C2) oraz CEM I 52,5R (C3). Składy fazowe klinkierów oraz podstawowe właściwości cementów przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Składy fazowe klinkierów oraz podstawowe właściwości stosowanych cementów

Parametr	CEM I 32,5R (C1)	CEM I 42,5R (C2)	CEM I 52,5R (C3)
Skład fazowy klinkieru:			
C <sub>3</sub> S w %	60,4	60,4	62,57
C <sub>2</sub> S w %	15,5	15,5	14,63
C <sub>3</sub> A w %	9,1	9,1	7,47
C <sub>4</sub> AF w %	8,8	8,8	7,17
Straty prażenia w %	0,70	1,53	0,78
Części nierozpuszczalne w %	0,31	1,24	0,29
Początek wiązania w min	169	151	75
Wytrzymałość na ściskani w MPa:			
– po 2 dniach dojrzewania	23	27	29
– po 28 dniach dojrzewania	47	51	58

Wykorzystano również trzy rodzaje domieszek przeciwmrozowych:

- D1 – bezchlorkowa domieszka do betonu przyspieszająca wiązanie, w której substancją aktywną jest azotan wapnia, gęstość domieszki 1,45 g/cm<sup>3</sup>, odczyn pH wynosi 3,5±1;
- D2 – domieszka bezchlorkowa do betonu nowej generacji o działaniu kompleksowym, silnie plastyfikująca; bazą surowcowa domieszki jest roztwór żywicy melaminowo-formaldehidowej i soli nieorganicznych; gęstość domieszki 1,25 g/cm<sup>3</sup>, odczyn pH wynosi od 6,5 do 7,5;
- D3 – domieszka bezchlorkowa, przeciwdziałająca zamarzaniu betonu lub zaprawy cementowej

i umożliwiającą narastanie wytrzymałości w niskich temperaturach; bazą surowcowa domieszki jest roztwór aminy alifatycznej i soli nieorganicznych; gęstość domieszki 1,30 g/cm<sup>3</sup>, odczyn pH wynosi od 6 do 7.

Tabela 4. Plan oraz wyniki eksperymentu do określenia wytrzymałości na ściskanie  $\bar{Y}_i$  ( $f_c$  w MPa) zapraw cementowych w zależności od czynników  $X_1, X_2, X_3, X_4$

Nr serii	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$\bar{Y}_i$	$S_i^2$
1.	-1	-1	-1	-1	2,64	0,131
2.	+1	-1	-1	-1	4,29	0,436
3.	-1	+1	-1	-1	6,82	0,289
4.	+1	+1	-1	-1	6,29	0,631
5.	-1	-1	+1	-1	3,77	0,142
6.	+1	-1	+1	-1	3,79	0,246
7.	-1	+1	+1	-1	3,94	0,100
8.	+1	+1	+1	-1	2,84	0,211
9.	-1	-1	-1	+1	26,21	13,825
10.	+1	-1	-1	+1	24,52	6,646
11.	-1	+1	-1	+1	32,60	8,464
12.	+1	+1	-1	+1	29,46	14,478
13.	-1	-1	+1	+1	45,29	6,471
14.	+1	-1	+1	+1	41,10	7,489
15.	-1	+1	+1	+1	46,62	18,534
16.	+1	+1	+1	+1	38,48	22,878
17.	-1	0	0	0	32,08	16,977
18.	+1	0	0	0	28,57	18,484
19.	0	-1	0	0	27,15	16,338
20.	0	+1	0	0	32,24	27,815
21.	0	0	-1	0	28,39	18,989
22.	0	0	+1	0	33,91	23,225
23.	0	0	0	-1	7,96	1,452
24.	0	0	0	+1	40,05	23,238

Do badania laboratoryjnego stosowano zaprawy o składzie normowym według PN-EN 196-1 (2005). Skład zaprawy na jeden zarób wynosił: cementu 450 g; piasku 1350 g; wody 225 g; domieszki przeciwmrozowej w ilości zgodnej z planem eksperymentu (ilość wody zmniejszono o objętość domieszki).

Próbki o wymiarach 40x40x160mm formowano bezpośrednio po wymieszaniu składników zaprawy. Próbki zagęszczano w dwóch warstwach wibrując na stoliku Vebe do momentu pojawienia się mleczka cementowego na powierzchni zaprawy. Bezpośrednio po zaformowaniu i oznaczeniu formy z próbkami zawijane były szczelnie w folię i umieszczane w komorze klimatyzacyjnej w określonej temperaturze zgodnie z planem eksperymentu (tab. 4). Próbki rozformowano po 24 godzinach dojrzewania (zaprawy dojrzewające w temperaturze -20 °C rozformowano po 48 godzinach). Po rozformowaniu próbki umieszczano ponownie w komorze klimatyzacyjnej w tej samej temperaturze, co przed rozformowaniem, i przechowywano w tych warunkach do momentu badania wytrzymałości na ściskanie, to znaczy do 28-go dnia.

Badanie wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych przeprowadzono zgodnie z procedurą podaną w PN-EN 196-1 (2005). Testy laboratoryjne

wykonano dla 6 połówek beleczek normowych z każdej serii.

#### 4. Wyniki badania i ich analiza

Wstępna analiza wyników badania (tab. 4) wykazała, że istnieje rozrzut wartości  $\bar{Y}_i$  w poszczególnych próbach jak i przy powtórnych pomiarach.

Jednorodność rzędu wariancji poszczególnych prób  $S_1^2, S_2^2, S_3^2, \dots, S_{24}^2$ , sprawdzono za pomocą testu statystycznego Cochra (Krysicki i in., 2003), który przewiduje porównanie wartości obliczeniowej kryterium Cochra  $G_{obl}$  z wartością krytyczną  $G_{kr}$ .

Wartość obliczeniową  $G_{obl}$  określa się według wzoru:

$$G_{obl} = \frac{\max\{S_i^2\}}{\sum_{i=1}^{24} S_i^2} \quad (3)$$

Sprawdzenie jednorodności ocen wariancji powtórnych pomiarów wykazało, że przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  obliczeniowa wartość kryterium Cochra  $G_{obl} = 0,1125$  okazała się mniejsza od wartości krytycznej  $G_{kr}^{0,05;5;24} = 0,1493$  (Krysicki i in., 2003). Można więc uważać, że wariancje prób są jednorodne. W takim przypadku wariancję generalną eksperymentu można obliczać jako średnia wartość z wariancji poszczególnych prób:

$$S_0^2 = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_{i=1}^{24} S_i^2 \quad (4)$$

Przy liczbie stopni swobody  $\nu = N \cdot (m-1) = 24 \cdot (6-1) = 120$  wartość  $S_0^2$  okazała się równa 10,312. Ocenę wariancji przyjęto jednakową w całym obszarze przestrzeni czynnikowej analizowanej funkcji celu.

Na podstawie wyników eksperymentu przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów opracowano następujący model matematyczny:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & 31,66 - 1,15X_1 + 1,14 \cdot X_2 + 3,25 \cdot X_3 + 15,67X_4 \\ & - 0,54X_1X_2 - 0,61X_1X_3 + -1,08X_1X_4 - 1,22X_2X_3 \\ & + 4,03X_3X_4 - 1,59X_1^2 - 2,22X_2^2 - 7,91X_4^2 \end{aligned} \quad (5)$$

W powyższym modelu część współczynników jako nieistotnych ( $a_{24}$  i  $a_{33}$ ) została usunięta. Ocenę istotności współczynników równania regresji przeprowadzono za pomocą testu z wykorzystaniem kryterium  $t$ -Studenta (Krasovskij i Filaretov, 1982). Przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ . Wariancje współczynników regresji  $S_0^2$  obliczono według wzoru:

$$S_{a_i}^2 = c_{ii} \cdot S_0^2 \quad (6)$$

gdzie  $c_{ii}$  jest diagonalnym elementem macierzy kowariancyjnej.

Sprawdzenie hipotezy o istotności statystycznej współczynników regresji  $a_i$  wykonano na pomocą

porównania obliczeniowych wartości  $t_i$  z wartością tabelaryczną  $t_{\alpha,f}$ . Wartość obliczeniowa kryterium  $t_i$  wyznaczano według wzoru:

$$t_i = \frac{|a_i|}{\sqrt{S_{a_i}^2}} \quad (7)$$

Jeśli  $t > t_{\alpha,f}$  to hipotezę o nieistotności współczynników  $a_i$  odrzuca się z prawdopodobieństwem  $p = 1 - \alpha$ . W naszym przypadku przy  $\alpha = 0,05$  oraz liczbie stopni swobody  $f = N \cdot (m-1) = 24 \cdot (6-1) = 120$  wartość tabelaryczna krytyczna wynosi  $t_{0,05;120} = 1,66$  (Krasovskij i Filaretov, 1982).

Adekwatność modeli sprawdzono za pomocą testu z wykorzystaniem kryterium Fishera  $F$  (Krasovskij i Filaretov, 1982). Obliczeniową wartość tego kryterium określono za pomocą wzoru:

$$F_{obl} = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2}{S_0^2 \cdot (N - (k+1))} \quad (8)$$

gdzie  $\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2$  jest sumą kwadratów odchyłeń wartości

( $\hat{Y}_i$ ) obliczonych z modelu (5) oraz uzyskanych jako średnie ( $\bar{Y}_i$ ) z pomiarów w eksperymencie,  $m$  jest liczbą powtórnych pomiarów w każdej próbie,  $N$  jest liczbą prób w eksperymencie,  $k+1$  jest liczbą istotnych współczynników w modelu (5).

Obliczeniową wartość  $F_{obl}$  porównuje się z tabelaryczną wartością krytyczną  $F_{\alpha,f_1,f_2}$ , dla której przyjmuje się:

$$\begin{aligned} f_1 &= N - (k+1) = 24 - 13 = 11; \\ f_2 &= N(m-1) = 24(6-1) = 120. \end{aligned}$$

Wykazano, że  $F_{obl} = 0,4645$  czyli wartość obliczeniowa kryterium Fishera jest mniejsza od odpowiedniej wartości krytycznej  $F_{0,05;11;120} = 1,87$  przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  (Krasovskij i Filaretov, 1982). To potwierdza adekwatność i efektywność otrzymanego równania regresji oraz jego przydatność dla dalszej analizy wpływu czynników.

#### 5. Interpretacja wyników badania

Wpływ rozpatrywanych czynników analizowano na podstawie równania regresji (2). Zaobserwowano, że największy wpływ na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej z domieszką przeciwmrozową wykazuje czynnik  $X_4$  czyli temperatura dojrzewania próbek. Wykryto, że przy zwiększaniu  $X_4$  od  $-20$  °C do  $+20$  °C wytrzymałość  $Y$  wzrasta prawie pięciokrotnie. Wpływ ten okazał się bardzo nierównomierny. W zakresie  $X_4$  od  $-20$  °C do  $0$  °C wielkość  $Y$  rośnie trzykrotnie szybciej, niż w przedziale od  $0$  °C do  $+20$  °C. Wykryto także ujemny efekt wspólnego oddziaływania czynników  $X_1X_4$  i dodatni efekt  $X_3X_4$ . Oznacza to, że wpływ  $X_4$  jest tym słabszy, im większą wartość przyjmuje  $X_1$ , natomiast

wpływ  $X_4$  jest tym większy, im większą wartość przyjmuje  $X_3$ . Przy czym każdy z tych czynników przy wspólnym oddziaływaniu wpływa silniej, niż przy osobnym, to jest występuje synergizm wpływu czynników  $X_3$  i  $X_4$ .

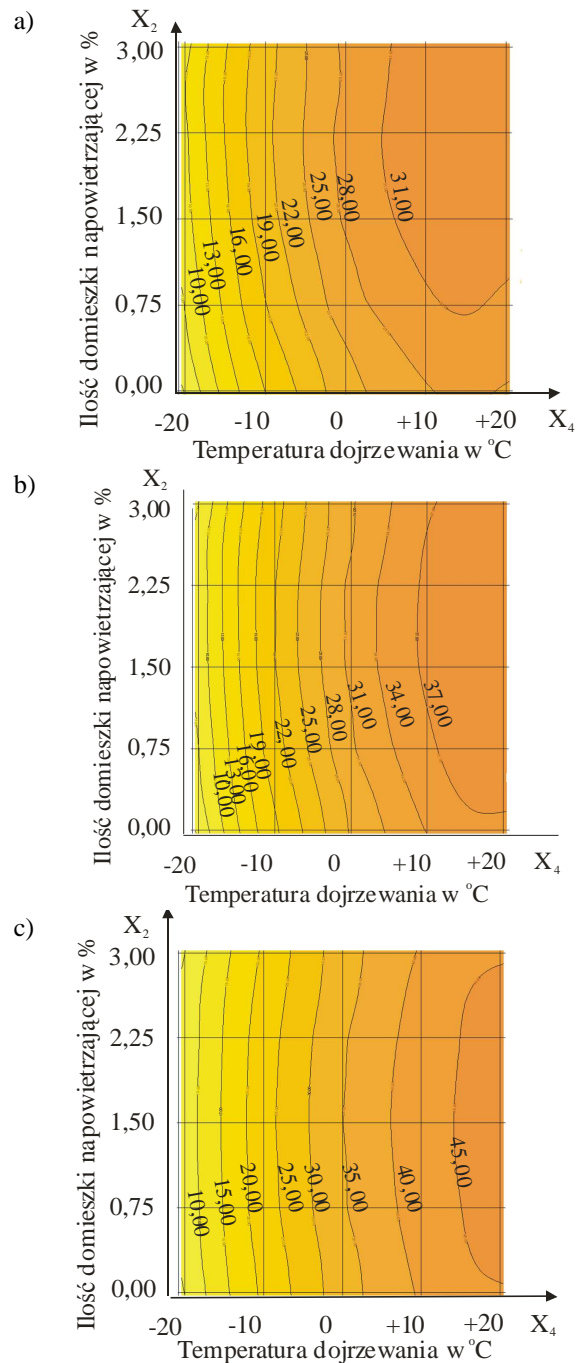
Na drugim miejscu pod względem stopnia wpływu na wartość  $Y$  lokuje się czynnik  $X_3$  czyli klasa wytrzymałości cementu. W badaniu ten czynnik jakościowy rozpatruje się na trzech poziomach:  $-1, 0, +1$ . W modelu wykryto dodatni efekt liniowy  $X_3$ , co oznacza, że przy zastosowaniu cementów C2 oraz C3 wytrzymałość zapraw w porównaniu z zaprawą z cementem C1 odpowiednio wzrasta o 11,4 i 22,9%. Zaobserwowano także dwa ujemne efekty wspólnego oddziaływania czynników  $X_1X_3$  i  $X_2X_3$ , a także dodatni efekt  $X_3X_4$  (analizowany wyżej). Oznacza to, że wpływ  $X_3$  słabnie ze wzrostem czynników  $X_1$  i  $X_2$ .

Kolejny czynnik jakościowy  $X_1$ , czyli rodzaj domieszki, wykazał ujemny liniowy i ujemny kwadratowy efekt. Oznacza to, że przy zastosowaniu domieszki D2 wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych rośnie w porównaniu z D1 o 1,5%, a przy zastosowaniu D3 – maleje o 8,8%. Występuje również niewielkie ujemne wspólne oddziaływanie czynników  $X_1$  i  $X_2$ , co oznacza, że wpływ  $X_1$  tym silniejszy, im większe  $X_2$ .

Czynnik  $X_2$ , czyli zawartość domieszki, wykazał dodatni liniowy i ujemny kwadratowy efekt. Wpływ ten nie jest równomierny. Przy  $X_2 = 0,257$  funkcja  $Y$  przyjmuje wartość ekstremalną równą 31,81. W wyniku przy zmianie  $X_2$  od  $-1$  do 0,257 funkcja  $Y$  wzrasta o 12,4%, a przy zmianie od 0,257 do  $+1$  spada o 4,3%.

Graficzną interpretację wyników eksperymentu pokazano na rysunku 1. Przy tworzeniu wykresów przyjęto założenie, że zaprawy cementowe wykonane są z domieszką D2, którą stanowił roztwór żywicy melaminowo-formaldehydowej i soli nieorganicznych, to jest przyjęto czynnik  $X_1 = 0$ . Pozwoliło to na przeanalizowanie wpływu klasy cementu (C1 – CEM I 32,5R, C2 – CEM I 42,5R i C3 – CEM I 52,5R) na wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych w zależności od zróżnicowanej temperatury dojrzewania ( $X_4$ ) oraz od ilości zastosowanej domieszki ( $X_2$ ).

Z analizy rysunku 1 wynika, że w zakresie temperatur ujemnych zastosowanie domieszki D2 w ilości od 0 do 3% masy cementu praktycznie nie wykazuje wpływu na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej niezależnie od klasy zastosowanego cementu. Przy temperaturze  $0^\circ\text{C}$  wytrzymałość na ściskanie próbek zapraw bez domieszki z cementami wynosi: dla C1 – 23,83 MPa, dla C2 – 28,30 MPa i dla C3 – 32,77 MPa. Obniżenie temperatury dojrzewania próbek do  $-20^\circ\text{C}$  spowodowało spadek 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie odpowiednio o: 82,0; 83,3 i 84,3%. Natomiast dojrzewanie zapraw cementowych w temperaturze  $-20^\circ\text{C}$  przy zastosowaniu domieszki przeciwmrozowej D2 w ilości 3% masy cementu powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie: dla cementu C1 – z 28,55 MPa do 9,0 MPa, to jest o 68,5%; dla cementu C2 – z 30,58 MPa do 7,0 MPa, to jest o 77,1%; dla cementu C3 – z 32,61 MPa do 5,0 MPa, to jest o 84,7%.



Rys. 1. Zależność wytrzymałości na ściskanie  $Y$  ( $f_c$ , MPa) próbek zaprawy cementowej z domieszką D1 od temperatury dojrzewania  $X_4$  i ilości domieszki przeciwmrozowej  $X_2$  z cementu:

- a) C1 – CEM I 32,5R;
- b) C2 – CEM I 42,5R;
- c) C3 – CEM I 52,5R

W zakresie temperatur dodatnich zastosowanie cementów różnych klas dało taki sam efekt. Obniżenie temperatury dojrzewania próbek z domieszką D2 od  $+20^\circ\text{C}$  do  $0^\circ\text{C}$  spowodowało spadek badanej cechy o odpowiednio 11,6; 20,2 i 26,6%. Natomiast dojrzewanie zaprawy cementowej w temperaturze  $0^\circ\text{C}$  bez zastosowania domieszki w porównaniu z dojrzewaniem w normalnych warunkach ( $+20^\circ\text{C}$ ) powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie: dla cementu C1 – z 27,6 MPa do 23,8 MPa,

to jest o 13,5%; dla cementu C2 – 36,1 MPa do 28,3 MPa, to jest o 21,5%; dla cementu C3 – 44,6 MPa do 32,8 MPa, to jest o 26,5%.

Z drugiej strony, zauważono, że w warunkach normalnych (+20 °C) zastosowanie badanej domieszki D2 powoduje zwiększenie wytrzymałości zaprawy na ściskanie o: 19,8% dla C1; 9,7% dla C2 i 4,8% dla C3. Przy czym największy pozytywny wpływ ustalono przy zawartości domieszki od 1,5% do 2,3% masy cementu.

Uzyskane prawidłowości stanowią mogą podstawową informację dla projektantów i wykonawców decydujących się na wykonywanie robót budowlanych w okresie zimowym.

## 6. Wnioski

Ustalono, że przy obniżeniu temperatury dojrzewania próbek od 0°C do -20°C zbadane domieszki przeciwmrozowe (D1 – na bazie azotanu wapnia, D2 – kompleksowa na bazie żywicy melaminowo-formaldehydowej i soli nieorganicznych, D3 – na bazie roztworu aminy alifatycznej i soli nieorganicznych) w ilości od 0 do 3% masy cementu praktycznie nie hamują spadku wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej niezależnie od klasy zastosowanego cementu.

Przy obniżeniu temperatury z +20°C do 0°C zaobserwowano dużo mniejszy spadek wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej, jednakże wpływ rozpatrywanych cementów okazał się istotniejszy, niż wpływ domieszki D2.

W warunkach normalnych (+20°C) domieszka przeciwmrozowa D2 podwyższa wytrzymałość na ściskanie zapraw z cementów C1, C2, C3 średnio o 11,4%. Przy czym największy pozytywny wpływ wykryto przy zawartości domieszki od 1,5 do 2,3% masy cementu.

## Literatura

- Bajorek G. (2007). Betonowanie zimą. *Budownictwo, Technologie, Architektura* Nr 4, 48-53.
- Bajorek G. (2009). Wspomaganie robót betonowych w okresie zimowym domieszkami do betonu. *Budownictwo, Technologie, Architektura* Nr 1, 52-56.
- Błaszczczyński T., Łowińska-Kluge A., Zagłoba B. (2004). Wpływ wykonawstwa na degradację betonu. *Materiały Budowlane* Nr 9 (383), 84-86.
- Brodskij V.Z., Brodskij L.I., Golikova T.I., Nikitina E.P., Pančenko L.A. (1982). Tablice planów eksperymentu dla faktorynych i polimial'nych modelej (sprawočnoe izdanie). *Izd-vo Metallurgia*, Moskwa.
- Instrukcja ITB nr 282. Wytyczne wykonywania robót budowlano – montażowych w okresie obniżonych temperatur. Warszawa 1995.
- Jasiczak J. (2003). Technologie budowlane II. *Alma Mater*.
- Krasovskij G.I., Filaretov G.F. (1982). Planirovanie eksperymentu. *Mn.: Izd-vo BGU*.
- Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M. (2003). Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Część II. Statystyka matematyczna. *PWN*, Warszawa.
- Łukowski P. (2003). Domieszki do zapraw i betonów. *Polski Cement Sp. z o.o.*, Kraków.
- Neville A. M. (2000). Właściwości betonu. *Polski Cement Sp. z o.o.*, Kraków.
- Woyciechowski P., Chudan A. (2002). Metody i środki pielęgnacji betonu w formach i „in situ”. W: *XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat pracy projektanta konstrukcji*, Ustroń.

### EFFECT OF CEMENT TYPE AND ANTIFREEZE ADMIXTURES ON COMPRESSIVE STRENGTH OF MORTARS

**Abstract:** The problem of conducting concrete works under conditions of low temperatures comes back together with winter. In the presented paper the results of laboratory investigation concerning the influence effect of selected antifreeze admixtures on compressive strength of the cement mortars curing in lower temperatures are presented. The test was conducted according to the principles of experiment planning. On the basis of the results a mathematical model was elaborated. The dependence of compressive strength of mortar samples was built as a function of some factors. These factors are *X1* the kind of antifreeze admixture, *X2* the amount of the antifreeze admixture, *X3* the cement type and *X4* the temperature of curing. The test results can provide the designers with the basic information concerning the possibility to continue building works in winter period.