

KINETYKA PROCESU HYDRATACJI KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH Z POPIOŁEM LOTNYM

Valeriy EZERSKIY, Małgorzata LELUSZ*

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

Streszczenie: W referacie przedstawiono wyniki badania laboratoryjnego wpływu: współczynnika wodno-cementowego, klasy cementu oraz czasu dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie (Y) próbek napowietrzonej zaprawy cementowej z dodatkiem popiołu lotnego. W badaniu przyjęto następujący zakres zmienności czynników: czynnik X_1 (W/C) – od 0,5 do 0,6; czynnik X_2 (klasa cementu) – 32,5; 42,5 oraz 52,5; czynnik X_3 (czas dojrzewania) – od 28 do 180 dni. Na podstawie wyników został opracowany model matematyczny zależności $Y = f(X_1, X_2, X_3)$ i przeanalizowany charakter oraz stopień wpływu poszczególnych czynników. Przestrzeń czynnikowa została zbadana na występowanie ekstremum. Ustalono, że maksymalne wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskuje się przy następujących wartościach czynników: $X_1 = -0,104$; $X_2 = 0$; $X_3 = 0,715$, tj. przy $W/C = 0,54$ z cementu klasy 42,5 oraz po 149 dniach dojrzewania

Słowa kluczowe: kompozyty cementowe, wytrzymałość na ściskanie, kinetyka narastania wytrzymałości.

1. Wprowadzenie

Dodatkiem powszechnie stosowanym do kompozytów cementowych jest popiół lotny. Materiał ten umożliwia ograniczenie zużycia coraz bardziej deficytowego klinkieru cementowego oraz pozwala uzyskać tworzywo cementowe o podwyższonych właściwościach (Neville, 2000; Giergiczny, 2006). Stosując popiół lotny jako jeden ze składników betonu należy liczyć się z możliwością wystąpienia niepożądanych skutków, takich jak zwiększenie wodozadržności mieszanki czy zmniejszenie skuteczności działania domieszek chemicznych oraz zmniejszenie odporności na działanie mrozu (Łukowski, 2003; Bastian, 1980). Najlepszą metodą poprawy mrozoodporności kompozytów cementowych jest stosowanie domieszek napowietrzających.

Czynniki materiałowe, które wpływają na jakość napowietrzenia, to rodzaj i ilość środka napowietrzającego, konsystencja mieszanki i wskaźnik W/C , ilość i rodzaj cementu, dodatki mineralne, kruszywo, woda zarobowa oraz inne domieszki chemiczne (Bastian, 1980; Lelusz i Ezerskiy, 2010a i 2010b). Istnieje zatem konieczność uściślenia danych o współzależności składników kompozytów cementowych takich jak popiół lotny, domieszka napowietrzająca, cement oraz woda na narastanie wytrzymałości próbek w czasie.

Spowolnienie procesu hydratacji kompozytów cementowych zawierających popiół lotny, a także

możliwe przyspieszenia tego procesu przy napowietrzaniu mieszanki betonowej wymaga przeprowadzenia specjalistycznych badań laboratoryjnych kinetyki twardnienia napowietrzonych kompozytów cementowych zawierających popiół lotny.

Celem pracy jest wykrycie prawidłowości procesu twardnienia próbek napowietrzonej zaprawy cementowej z dodatkiem popiołu lotnego oraz ocena charakteru i stopnia wpływu trzech czynników: współczynnika wodno-cementowego, klasy cementu oraz czasu dojrzewania na wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy cementowej zawierającej popiół lotny i domieszki napowietrzającą z opracowaniem modelu matematycznego zależności wytrzymałości od wyżej wymienionych czynników.

2. Sformułowanie problemu i wybór planu eksperymentu badawczego

Zgodnie z przyjętym celem pracy wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych f_c , MPa (odpowiedź Y) postanowiono zbadać w zależności od: współczynnika wodno-cementowego W/C (czynnik X_1), klasy wytrzymałości cementu CEM (czynnik X_2) oraz czasu dojrzewania próbek τ (czynnik X_3).

Badanie przeprowadzono zgodnie z zasadami planowania eksperymentu. Według tych zasad został

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

uzasadniony wybór zakresów zmienności oraz poziomów czynników. 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 (1):

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

gdzie: \tilde{X}_i , $\tilde{X}_{i\max}$, $\tilde{X}_{i\min}$ są odpowiednio bieżącymi, maksymalnymi i minimalnymi wartościami naturalnymi i -tego czynnika.

Przy unormowaniu wartości czynników uwzględniono, że jeden z nich, a mianowicie czynnik trzeci zmieniał się nierównomiernie. W związku z tym unormowaną wartość tego czynnika (X_3) określono z poniższej zależności (2), która pozwoliła wykonać linearyzację tego czynnika:

$$X_3 = -0,000033(\tilde{X}_3)^2 + 0,02\tilde{X}_3 - 1,5348 \quad (2)$$

Wartościom czynnika $\tilde{X}_3 = 28, 90$ i 180 odpowiadały wartości czynnika $X_3 = -1, 0, +1$.

Do opisu przestrzeni czynnikowej $Y_i = f(X_1, X_2, X_3)$ została wybrana postać funkcji (3), współczynniki której należało obliczyć za pomocą metody najmniejszych kwadratów:

$$\tilde{Y} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 \quad (3)$$

gdzie: X_1, X_2, X_3 są czynnikami zmiennymi (zgodnie z tab. 1); a_1, a_2, \dots, a_{33} są współczynnikami równania regresji.

Przy wyborze planu eksperymentu uwzględniono konieczność uzyskania adekwatnego opisu matematycznej rozpatrywanej funkcji celu i możliwość skrócenia ilości prób. Zastosowano przy tym plan kompozycyjny symetryczny trójpoziomowy dla trzech zmiennych (Korzyński, 2006) zawierający $N = 14$ prób (tab. 4). W każdej próbie przyjęto powtarne pomiary na 6 próbkach. Liczba powtórzeń została uzasadniona na podstawie wstępnych badań. Ilość pomiarów w eksperymencie przy sześciokrotnych powtórzeniach każdej próby wynosiła 84. Przy realizacji planu eksperymentu przestrzegano zasad randomizacji kolejności badania prób.

3. Metoda prowadzenia badania

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone na próbkach stwardniałych zapraw cementowych o składzie zgodnym z planem eksperymentu (tab. 1, tab. 4). We wszystkich składach zapraw ilość cementu była stała i wynosiła 450 kg/m^3 . Stosowano trzy rodzaje cementu portlandzkiego: CEM I 32,5; CEM I 42,5 N-HSR/NA oraz CEM I 52,5 R-NA. Składy fazowe klinkierów oraz podstawowe właściwości cementów przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 1. Zakresy zmienności rozpatrywanych czynników X_1, X_2, X_3

Czynniki zmienne	Jednostka miary	Poziom zmienności		
		-1	0	+1
Współczynnik wodno-cementowy (W/C), X_1	-	0,5	0,55	0,6
Klasa wytrzymałości cementu (CEM), X_2	-	32,5	42,5	52,5
Czas dojrzewania (τ), X_3	dni	28	90	180

Tab.2. Składy fazowe klinkierów oraz podstawowe właściwości stosowanych cementów

Parametr	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5N-HSR/NA	CEM I 52,5 R
Skład fazowy klinkieru:			
C_3S , [%]	60,4	56,6	62,57
C_2S , [%]	15,5	18,3	14,63
C_3A , [%]	9,1	1,5	7,47
C_4AF , [%]	8,8	16,4	4,17
Straty prażenia, [%]	1,15	0,70	0,91
Części nierozpuszczalne, [%]	1,73	0,31	0,36
Początek wiązania, [min]	170	230	110
Wytrzymałość na ściskanie:			
po 2 dniach dojrzewania, [MPa]	23	15	29
po 28 dniach dojrzewania, [MPa]	47	51	58

Tab. 3. Wyniki analizy sitowej piasku rzeczno-flukanego

Fracja	Zawartość [%]
0/0,125	1,4
0,125/0,25	11,3
0,25/0,5	43,0
0,5/1	29,8
1/2	12,8
2/4	1,6

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

Nr serii	X_1	X_2	X_3	\bar{Y}_i	S_i^2
1	-1	-1	-1	31,3	6,7
2	+1	-1	-1	28,2	4,8
3	-1	+1	-1	36,8	3,6
...
12	0	+1	0	48,6	6,4
13	0	0	-1	43,9	5,6
14	0	0	+1	51,2	3,8

Do wykonania próbek zastosowano popiół lotny uzyskany w wyniku spalania węgla kamiennego w elektrociepłowni w ilości 33% masy cementu. Na podstawie dyfrakcyjnej analizy rentgenowskiej ustalono, że podstawowe fazy występujące w popiele to mullit i β -kwarc. Popiół zawierał dużo fazy szklistej, anhydryt oraz tlenek wapnia i nieznaczne ilości minerałów wtórnych – kalcytu i gipsu. Zawartość wolnego CaO wynosiła 0,25%. Straty prażenia monitorowane przez 25 dni były mniejsze niż 4,8%. Gęstość właściwa popiołu wynosiła 2,23 kg/dm³.

Do zapraw zastosowano bezchlorkową domieszkę napowietrzającą na bazie żywic naturalnych o gęstości 1,06 kg/dm³ i odczynie pH 12, która dodawano w ilości 0,15% masy cementu.

Do wykonania próbek stosowano jako kruszywo piasek rzeczny płukany. Wyniki analizy sitowej piasku przedstawiono w tablicy 3.

Próbki belecзки 40x40x160mm formowano bezpośrednio po wymieszaniu składników zaprawy. Próbki zagęszczano na stoliku Vebe i rozformowano po 24 godzinach dojrzewania, a następnie umieszczano w wodzie, gdzie dojrzewały do momentu badania wytrzymałości zgodnie z planem eksperymentu (tab. 1, tab. 4).

Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek przeprowadzono zgodnie z procedurą podaną w PN-EN 196-1:2005.

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 $S_1^2, S_2^2, S_3^2, \dots, S_{14}^2$ sprawdzono za pomocą testu statystycznego Cochran (Korzyński, 2006). Test ten przewiduje porównanie wartości obliczeniowej kryterium Cochran G_{obl} z wartością krytyczną. Wartość obliczeniową G_{obl} określa się według wzoru (4):

$$G_{obl} = \frac{\max\{S_i^2\}}{\sum_{i=1}^{14} S_i^2} \quad (4)$$

Sprawdzenie jednorodności ocen wariancji powtórnych pomiarów wykazało, że przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ obliczeniowa wartość kryterium Cochran $G_{obl} = 0,1837$ okazała się mniejsza od wartości krytycznej $G_{kr}^{0,05;5;14} = 0,2212$ (Korzyński, 2006). Można więc uważać, że wariancje prób są jednorodne. W takim przypadku wariancję generalną eksperymentu można obliczać jako średnia wartość z wariancji poszczególnych prób (5):

$$S_0^2 = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_{i=1}^{14} S_i^2 \quad (5)$$

Ustalono, że przy liczbie stopni swobody $v = 70$ wyniosła ona 5,72. Wartość wariancji przyjęto jednakową w całym obszarze przestrzeni czynnikowej analizowanej funkcji celu.

Na podstawie wyników eksperymentu przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów opracowano model matematyczny (6), który po usunięciu współczynnika nieistotnego (a_{13}) otrzymał postać:

$$\tilde{Y} = 52,31 - 1,33X_1 + 1,69X_2 + 5,13X_3 + 1,05X_1X_2 - 1,08X_2X_3 - 6,39X_1^2 - 4,54X_2^2 - 3,59X_3^2 \quad (6)$$

Ocenę istotności współczynników równania regresji przeprowadzono za pomocą testu z wykorzystaniem kryterium t-Studenta (Korzyński, 2006). Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$. Wariancje współczynników regresji S_{ai}^2 obliczono według wzoru (7):

$$S_{ai}^2 = c_{ij} \cdot S_0^2 \quad (7)$$

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 (8):

$$t_i = \frac{|a_i|}{\sqrt{S_{ai}^2}} \quad (8)$$

Jeśli $t_i > t_{\alpha f}$ to hipotezę o nieistotności współczynników a_i odrzuca się z prawdopodobieństwem $p = 1 - \alpha$.

Adekwatność modelu sprawdzono za pomocą testu z wykorzystaniem kryterium Fishera F (Korzyński, 2006). Obliczeniową wartość tego kryterium określono za pomocą wzoru (9):

$$F_{obl} = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2}{S_0^2 \cdot (N - (k + 1))} \quad (9)$$

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

wartości (\hat{Y}_i) obliczonych z modelu (6) 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 (6).

Obliczeniową wartość F_{obl} dla uzyskanego modelu porównano z tabelaryczną wartością krytyczną $F_{\alpha f_1, f_2}$, dla której:

$$f_1 = N - (k + 1) = 14 - 9 = 5;$$

$$f_2 = N(m - 1) = 14(6 - 1) = 70.$$

Sprawdzenie wykazało, że wartość obliczeniowa $F_{obl} = 1,7141$ jest mniejsza od odpowiedniej wartości krytycznej kryterium Fishera $F_{0,05;5;70} = 2,36$ (Korzyński, 2006). Potwierdza to adekwatność i efektywność otrzymanego równania regresji oraz jego przydatność do dalszej analizy wpływu czynników.

5. Interpretacja wyników badania

Wpływ rozpatrywanych czynników analizowano na podstawie równania regresji (6). Okazało się, że największy wpływ na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej wykazuje czynnik X_3 – czas dojrzewania. Wykryto, że przy zmianie X_3 od -1 (28 dni) do $+1$ (180 dni) wytrzymałość Y wzrasta o 24%. Jednak wzrost ten jest nierównomierny: przy zmianie czasu dojrzewania z 28 do 90 dni Y wzrasta o 20%, natomiast przy zmianie X_3 z 90 do 180 dni wzrasta zaledwie o 4%. Przy czasie dojrzewania 149 dni próbki uzyskały najwyższą wytrzymałość równą 54,14 MPa. Przy dalszym wzroście czasu dojrzewania wytrzymałość Y wahała się na poziomie dokładności pomiarów, tj. dalsze wydłużanie czasu dojrzewania nie daje znaczącego efektu. Wykryto również ujemny efekt wspólnego oddziaływania czynników X_2X_3 . Oznacza to, że niezależna zmiana X_3 i X_2 wpływa na wytrzymałość Y mocniej, niż gdy wahania tych czynników występują jednocześnie.

Na drugim miejscu pod względem stopnia wpływu na wartość Y lokuje się czynnik X_2 – klasa wytrzymałości cementu. Wykryto niewielki dodatni efekt liniowy i ujemny kwadratowy czynnika X_2 . Uwzględniając fakt, że czynnik ten może przyjmować tylko trzy wartości dyskretne, przeanalizowano zmianę wytrzymałości Y na trzech poziomach tego czynnika. Okazało się, że przy zmianie klasy cementu z 32,5 na 42,5 wytrzymałość Y próbek wzrasta o 13,5%, zaś zmiana klasy cementu z 42,5 na 52,5 spowodowała w przyjętych warunkach eksperymentu laboratoryjnego spadek o 6,2%. Wykryto dodatni efekt wspólnego oddziaływania czynników X_1X_2 oraz ujemny X_2X_3 . Wynika z tego, że czynnik X_2 wpływa tym mocniej, im większe wartości przyjmują czynniki X_1 . Wpływ efektu X_2X_3 przeanalizowano wyżej.

Najmniejszy wpływ na wytrzymałość Y okazał czynnik X_1 – współczynnik wodno-cementowy.

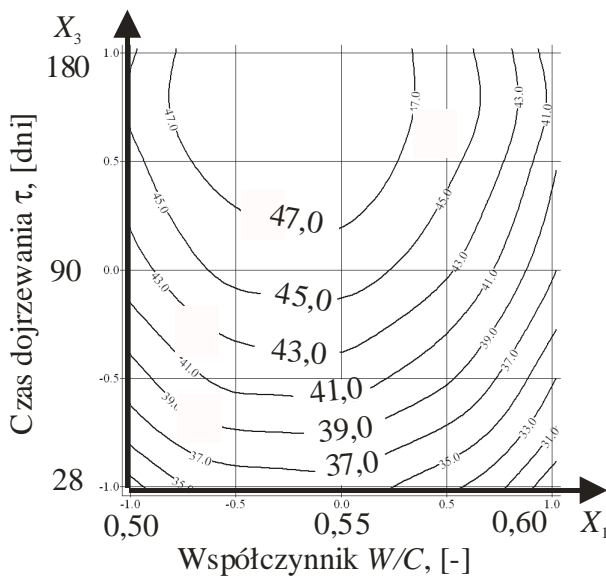
Wykryto, że wraz ze wzrostem wartości W/C wytrzymałość Y zmienia się bardzo nierównomiernie i zależność ma ekstremum przy W/C = 0,54. Przy zmianie W/C od 0,5 do 0,54 Y wzrasta o 10,9% natomiast przy zmianie od 0,54 do 0,60 Y spada o 16,5%. Przy W/C = 0,54 uzyskano najwyższą wytrzymałość wynoszącą 52,38MPa. Wykryto również dodatni efekt wspólnego oddziaływania czynników X_1X_2 , który świadczy o tym, że wpływ czynnika X_1 słabnie ze wzrostem czynnika X_2 .

Przestrzeń czynnikową zbadano na występowanie ekstremum. Okazało się, że wytrzymałość na ściskanie próbek osiąga maksymalną wartość 54,21MPa przy następujących warunkach: $X_1 = -0,104$; $X_2 = 0$; $X_3 = 0,715$, tj. przy W/C = 0,54 z cementu klasy 42,5 oraz po 149 dniach dojrzewania. Minimalną wartość wytrzymałości na ściskanie 27,51MPa uzyskano przy $X_1 = +1$; $X_2 = -1$; $X_3 = -1$; tj. przy W/C = 0,50 z cementu klasy 32,5 oraz po 28 dniach dojrzewania.

Graficzną interpretację wyników eksperymentu pokazano na rysunkach 1-3. Przy tworzeniu wykresów przyjęto założenie, że do wykonania wszystkich próbek zastosowano popiół lotny w ilości 33% masy cementu oraz dodawano domieszką napowietrzającą w ilości

0,15% masy cementu. Analizowano zależność wytrzymałości na ściskanie (Y) od współczynnika wodno-cementowego (X_1) i czasu dojrzewania (X_3) próbek wykonanych z różnych klas cementu ($\tilde{Y}_3 = 32,5; 42,5$ i $52,5$).

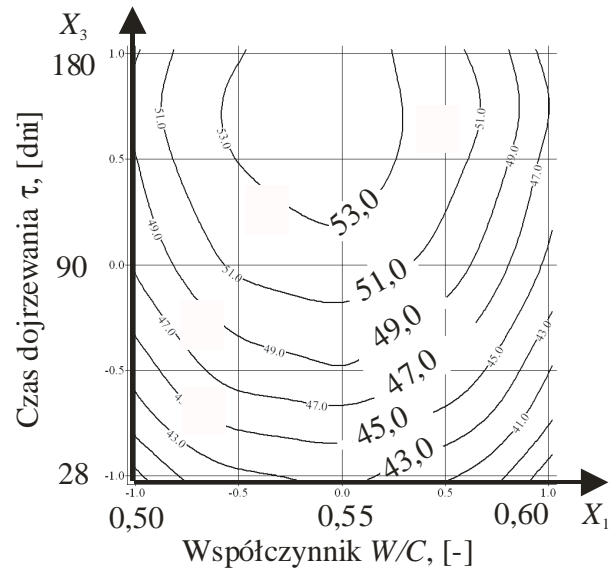
Analizując rysunek 1, można stwierdzić, że zależność wytrzymałości na ściskanie Y od X_1 jest nie równomierna i posiada ekstremum dla $X_1 = -0,186$ ($W/C = 0,54$). Przy zmianie X_1 od -1 do $-0,186$ Wytrzymałość na ściskanie rośnie o 10%, zaś przy dalszym wzroście X_1 wytrzymałość maleje o 21%. Inny charakter ma zależność wytrzymałości na ściskanie od czasu dojrzewania. Przy zmianie X_3 od -1 ($\tau = 28$ dni) do $0,865$ ($\tau = 165$ dni) wartość Y wzrasta o 34,4% i osiąga 48,77 MPa. Dalszego wzrostu Y praktycznie nie wykazuje, tzn. że po 170 dniu dojrzewania wytrzymałość próbek zaprawy z cementu klasy 32,5 nie zmienia się.



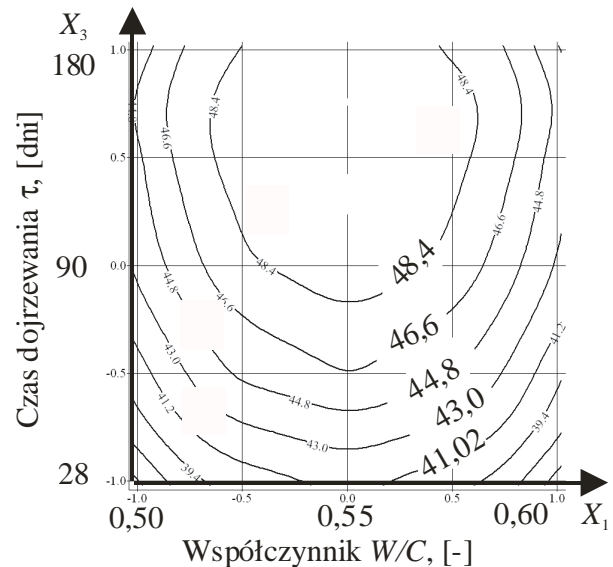
Rys. 1. Zależność wytrzymałości na ściskanie Y (f_c , MPa) próbek zaprawy cementowej od współczynnika wodno-cementowego X_1 i czasu dojrzewania X_3 wykonanej z cementu o klasie wytrzymałości 32,5

Na rysunku 2, widać, że charakter zależności wytrzymałości na ściskanie Y od X_1 i X_3 praktycznie nie zmienił się. Jedynie przemieściły się ekstrema lokalne tych zależności a średnia wytrzymałość wzrosła 1,14 razy. Wytrzymałość próbek po 90 dniach dojrzewania wyniosła 52,38 MPa dla $X_1 = -0,104$. Z drugiej strony dla próbek o $W/C = 0,55$ wytrzymałość osiągnęła wartość 54,14 MPa przy $X_3 = 0,715$ ($\tau = 149$ dni).

Zbliżony charakter zależności wytrzymałości na ściskanie od X_1 i X_3 przedstawia wykres na rysunku 3. Przy zmianie X_1 od -1 do $-0,022$ wytrzymałość na ściskanie rośnie o 14%, zaś przy dalszym wzroście X_1 wytrzymałość maleje o 15,4%. Przy zmianie X_3 od -1 ($\tau = 28$ dni) do $0,564$ ($\tau = 135$ dni) wartość Y wzrasta o 21% i osiąga 50,60 MPa.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie Y (f_c , MPa) próbek zaprawy cementowej od współczynnika wodno-cementowego X_1 i czasu dojrzewania X_3 wykonanej z cementu o klasie wytrzymałości 42,5



Rys. 3. Zależność wytrzymałości na ściskanie Y (f_c , MPa) próbek zaprawy cementowej od współczynnika wodno-cementowego X_1 i czasu dojrzewania X_3 wykonanej z cementu o klasie wytrzymałości 52,5

Ogólnie można stwierdzić, że osiągnięcie maksimum wytrzymałości na ściskanie próbek napowietrzonej zaprawy cementowej zawierającej popiół lotny w ilości 33% masy cementu następuje tym szybciej, im wyższa jest klasa zastosowanego cementu. Dla próbek z cementem klasy 32,5 efektywny czas dojrzewania wyniósł 165 dni; klasy 42,5 – 149 dni; klasy 52,5 – 135 dni. Natomiast maksimum wytrzymałości na ściskanie tych samych próbek zostało osiągnięte dla $W/C = 0,54$ niezależnie od klasy cementu.

6. Wnioski

1. Największy wpływ na wytrzymałość na ściskanie próbek napowietrzanej zaprawy cementowej zawierającej popiół lotny w ilości 33% masy cementu spośród trzech zbadanych czynników wykazał czas dojrzewania. Przy zmianie tego czynnika z 28 dni do 90 dni wytrzymałość wzrosła o 20%, natomiast przy zmianie czasu dojrzewania z 90 do 180 dni wytrzymałość była większa tylko o 4%.
2. Wykryto, że czas dojrzewania do osiągnięcia maksymalnej wytrzymałości na ściskanie badanych próbek zależy od klasy wytrzymałości zastosowanego cementu. Im wyższa klasa cementu tym krótszy jest czas efektywnego narastania wytrzymałości.
3. Ustalono, że wytrzymałość na ściskanie badanych próbek osiąga maksimum dla $W/C = 0,54$ niezależnie od klasy cementu.

Maksymalną wytrzymałość na ściskanie zbadanych próbek uzyskano na poziomie 54,2 MPa po 149 dniach dojrzewania przy $W/C = 0,54$ wykonanych z cementu klasy 42,5.

Literatura

- Neville A.M. (2000). Właściwości betonu. *Polski Cement Sp. z o.o.*, Kraków.
- Giergiczny Z. (2006). Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków.
- Łukowski P. (2003). Domieszki do zapraw i betonów. *Wyd. Polski Cement*, Kraków.
- Bastian S. (1980). Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym. *Arkady*, Warszawa.
- Lelusz M., Ezerskiy V. (2010a). Kinetyka narastania wytrzymałości napowietrzonych zapraw cementowych z dodatkiem popiołu lotnego. W: materiałach konferencji *Dni Betonu'2010*, 243-251.
- Lelusz M., Ezerskiy V. (2010b). Ocena wpływu zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość zapraw cementowych. *Przegląd budowlany*, 11/2010, 35-38.
- Korzyński M. (2006). Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych. *WNT*, Warszawa.

KINETICS OF HYDRATION PROCESS OF CEMENT COMPOSITES WITH FLY ASH ADDITION

Abstract: In the paper the results of laboratory investigation concerning the influence of: the water-cement ratio, the cement class and the time of curing on compressive strength of air-entrained cement mortars is presented. The range of changeability factors was determined: X_1 factor (W/C ratio) – from 0,5 to 0,6; X_2 factor (the cement class) – 32,5, 42,5 and 52,5; X_3 factor (the time of curing) – from 28 to 180 days. On the basis of the results a mathematical model was elaborated $Y = f(X_1, X_2, X_3)$ and the character and the influence grade of each factors were analysed. The factor space was examined for occurrence of extrema. The optimum factor values assuring maximum compressive strength were given. They are for the following factor values: $X_1 = -0,104$; $X_2 = 0$; $X_3 = 0,715$, i.e.: $W/C = 0,54$ from the cement of 42,5 class and after 149 days of curing.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej S/WBiIS/1/2010 finansowanej ze środków MNiSW w latach 2010-2011