

BADANIA I STUDIA – RESEARCH AND STUDIES

Jan Bobrowicz*

ZALEŻNOŚĆ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE ZAPRAW OD ILOŚCI WYDZIELONEGO CIEPŁA HYDRATAcji CEMENTÓW W OBNIŻONYCH TEMPERATURACH

W artykule przedstawiono wyniki badań i analizę zależności przyrostu wytrzymałości od ilości wydzielonego ciepła hydratacji. Badania przeprowadzono w warunkach izotermicznych. Zależność badano w temperaturach 20°C, 10°C i 0°C. Porównywano ilości wydzielanego ciepła hydratacji cementu z wytrzymałością zapraw normowych po tym samym czasie dojrzewania w danej temperaturze. Graficzne zestawienie wyników wykazuje, że przyrost wytrzymałości zaprawy normowej w funkcji ilości ciepła wydzielonego w procesie hydratacji cementu jest funkcją prostoliniową. Wyniki analizy dowodzą, że możliwe jest zastosowanie kalorymetrii izotermicznej do prognozowania przyrostu wytrzymałości zapraw w obniżonych temperaturach we wczesnym okresie dojrzewania.

1. Wprowadzenie

W technologii betonu stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczące jego wytrzymałości i trwałości. Beton jest tworzywem dojrzewającym w czasie, którego parametry zmieniają się proporcjonalnie do zmian zachodzących w spoiwie. Szybkość dojrzewania betonu czy zaprawy jest zależna od temperatury otoczenia.

Prace budowlane są prowadzone przez cały rok. Warunki klimatyczne w Polsce można podzielić na dwa istotne z punktu widzenia technologii betonu okresy. Pierwszy to okres, w którym średnia dobowa temperatura mieści się w przedziale od 10°C do 25°C. Drugi to okres obniżonej temperatury.

Warunki obniżonej temperatury w Polsce trwają, jak podaje Z. Jamróży [1], od 15 listopada do 15 marca. Średnia dobowa temperatura powietrza w tym okresie nie przekracza $T_{sr} \leq +10^\circ\text{C}$. Średnią dobową temperaturę oblicza się zgodnie ze wzorem

$$T_{sr} = \frac{T_7 + T_{13} + 2T_{21}}{4} \quad (1)$$

gdzie T_7 , T_{13} , T_{21} – temperatury otoczenia o godzinie 7⁰⁰, 13⁰⁰ i 21⁰⁰.

* dr inż. – adiunkt w Zakładzie Certyfikacji ITB

Okres obniżonych temperatur sprawia, że wydłuża się czas dojrzewania betonów i zapraw cementowych. Oznacza to, że czas oczekiwania na uzyskanie przez dojrzewający beton sprawności eksploatacyjnej wydłuża się. Zakładane koszty prac są zwiększane między innymi z powodu przyjmowanego zwolnienia tempa robót, przedłużenia wynajmu deskowań, wydłużenia czasu pielęgnacji betonu, na przykład ogrzewania, oraz kosztów domieszek przyspieszających przyrost wytrzymałości, których stosowanie w okresie zimy jest powszechne. Koszty te mogłyby być mniejsze, gdyby sposoby przewidywania narastania wytrzymałości były bardziej precyzyjne.

Poznanie procesu rozwoju wczesnych wytrzymałości spoiw w obniżonych temperaturach jest przedmiotem zainteresowania wielu praktyków i badaczy [2–7]. Z. Jamroży [1] proponuje uproszczony sposób szacowania poziomu wytrzymałości betonu – jako miary jego dojrzałości D . Dojrzałość definiuje jako stałą wartość iloczynu czasu dojrzewania t (dni) i temperatury dojrzewania T ($^{\circ}\text{C}$) powiększoną o 10°C . Oznacza to, że beton w obniżonej temperaturze otoczenia osiąga wytrzymałość zbliżoną do betonu dojrzewającego w temperaturze odniesienia, zgodnie z równaniem

$$D = t(T + 10), \text{ }^{\circ}\text{C} \times \text{dni} \quad (2)$$

gdzie: D – dojrzałość betonu w temperaturze T ,
 t – czas dojrzewania, dni,
 T – temperatura, $^{\circ}\text{C}$.

Ten doświadczalny wzór umożliwia przybliżone określenie poziomu dojrzałości betonu twardniejącego w obniżonych temperaturach powyżej -10°C przy założeniu, że odniesiemy dojrzałość do temperatury 20°C .

W wielu przypadkach jest pożądane, aby poziom dojrzałości – rozumiany głównie jako wytrzymałość na ściskanie – określać z większą dokładnością. Do bardziej precyzyjnego określania dojrzałości betonu zdaniem P. Witakowskiego [7] lepsza jest zaproponowana przez P. Freilsben-Hansena i E. J. Pedersena [8] funkcja temperaturowa, którą można zapisać równaniem

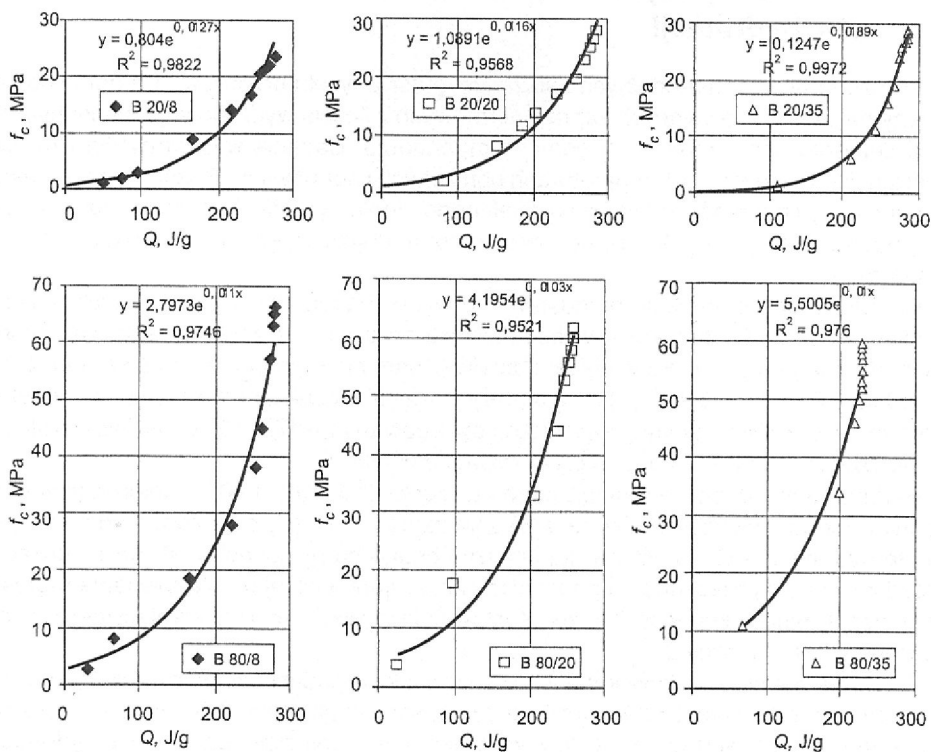
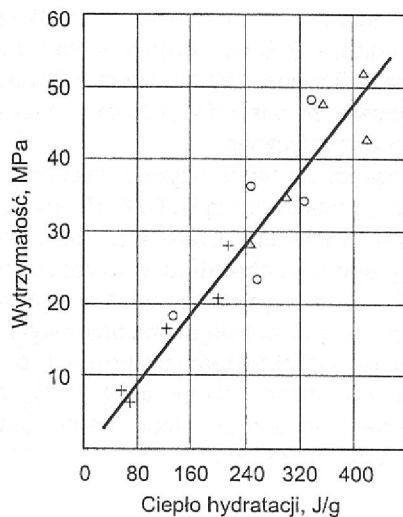
$$f(T) = k_{\text{exp}} \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_k} \right) \right] \quad (3)$$

gdzie: k – współczynnik proporcjonalności,
 E – energia aktywacji, kJ/mol,
 R – uniwersalna stała gazowa; $R = 8,314 \text{ J}/(\text{molK})$,
 T_k – temperatura absolutna, K.

Analiza ostatnio wydanych publikacji [9–13] świadczy o tym, że rozwijane są metody badawcze i możliwości obliczeniowe, u podstaw których leży wykorzystanie metod instrumentalnych stosowanych do badań w skali mikro w celu eliminowania uciążliwych i drogich badań w skali makro.

Próby określania podstawowej właściwości, jaką jest wytrzymałość, za pomocą pomiarów innych cech są podejmowane od dawna. Wyniki badań cytowanych już wcześniej autorów oraz badań prowadzonych ostatnio świadczą, że jest duże zainteresowanie problemem przewidywania wytrzymałości na podstawie pomiaru ciepła hydratacji. S. Peukert [14] analizuje wyniki badań, między innymi M. Venuata [15], prezentując prostoliniową zależność wytrzymałości zaprawy od ilości ciepła hydratacji (rys. 1).

Rys. 1. Korelacja między ciepłem hydratacji a wytrzymałością zaprawy [14]
 Fig. 2. Correlation between hydration heat and compressive strength of mortar [14]



Rys. 2. Korelacja między ciepłem hydratacji a wytrzymałością betonu – $F_c = f(Q)$ [4]
 Fig. 2. Correlation between hydration heat and compressive strength of concrete – $F_c = f(Q)$ [4]

Podobnie I. D. Zaporozec, S. D. Okororow i A. A. Parijskij [16] sugerują, że zależność jest liniowa. Z kolei ostatnio publikowane wyniki M. Kaszyńskiej [4] (rys. 2), a także prace G. Thielena i W. Hintzena [17] wskazują, że zależność ta jest wykładnicza. Należy podkreślić, że zależność ta została uzyskana na podstawie badań prowadzonych w warunkach adyabatycznych.

Poglądy na temat użyteczności dotychczasowych rozwiązań, wykorzystując wyniki badań, podsumowują R. C. A. Pinto, S. V. Hobbs, K. C. Hover [18], którzy twierdzą, że zastosowanie funkcji temperaturowej dobrze prognozuje wytrzymałości betonu dojrzewającego w temperaturach wyższych niż 20°C. Przy temperaturze na przykład 35°C i 60°C przewidywane zgodnie z równaniem (3) wytrzymałości 69,5 MPa i 56,4 MPa zostały w pełni potwierdzone przez wyniki badań przeprowadzonych przez tych autorów. Stosując tę funkcję temperaturową do prognozowania wytrzymałości betonu dojrzewającego w obniżonej temperaturze 5°C, otrzymuje się nierealne wartości wytrzymałości końcowej badanego betonu (na poziomie 1500 MPa), podczas gdy eksperymentalnie uzyskano 68,9 MPa.

3. Zależność wytrzymałość na ściskanie w funkcji ilości ciepła hydratacji

W celu ustalenia miarodajnych zależności autor artykułu przeprowadził porównania wytrzymałości dojrzewających zapraw normowych z ilością wydzielonego ciepła hydratacji cementu oznaczoną w tej samej temperaturze. Badania wytrzymałości i ciepła hydratacji prowadzono w temperaturach obniżonych i normowych. Poznanie zależności przyrostu wytrzymałości od ilości wydzielonego ciepła hydratacji powinno pozwolić na prognozowanie wytrzymałości betonów czy zapraw dojrzewających w warunkach niskich temperatur.

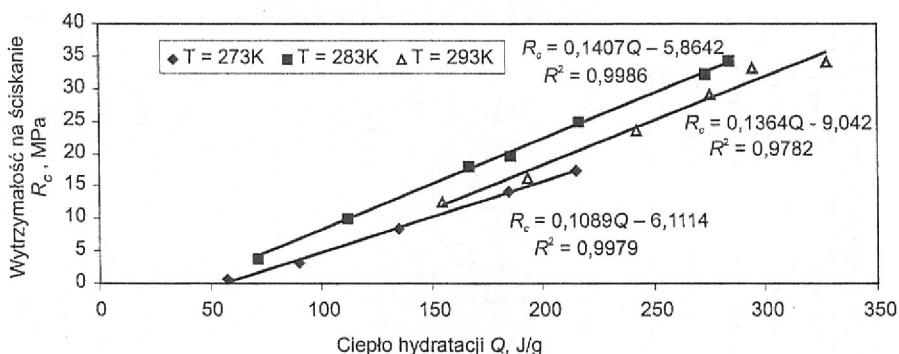
W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań własnych podjętych w celu ustalenia zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie zaprawy a ilością ciepła wydzielającego się z hydratyzującego spoiwa. Badaniom poddano zaprawę normową (zgodnie z PN-EN 196-1). Ciepło hydratacji cementów oznaczano metodą kalymetrii izotermicznej w oryginalnym urządzeniu skonstruowanym w ITB [19]. Właściwości i skład cementów używanych do badań przedstawiono w tablicy 1.

Badania prowadzono w temperaturze otoczenia 0°C, 10°C i 20°C, analizując w tym samym czasie t_i wytrzymałości na ściskanie zapraw – $R_c(t_i)$ oraz ilość wydzielonego ciepła hydratacji – $Q(t_i)$. Wyniki tej analizy podano na rysunkach 3–8. Na rysunkach przedstawiono wyznaczone na podstawie analizy korelacyjnej proste równania regresji oraz współczynniki korelacji liniowej. Zestawienie wyników analizy korelacyjnej zamieszczono także w tablicy 2.

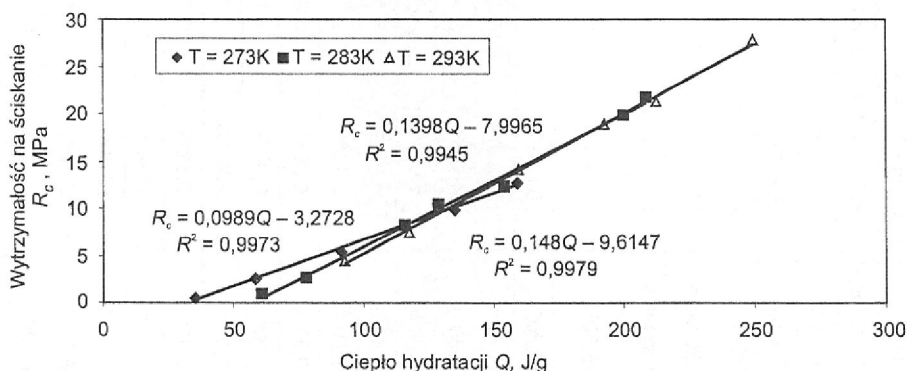
Wartości współczynników korelacji we wszystkich badaniach przekraczające 0,90 potwierdzają założenie, że zależność – przy tym samym poziomie dojrzałości – przyrostu wytrzymałości na ściskanie zapraw w funkcji ilości wydzielonego ciepła hydratacji oznaczanego metodą kalymetrii izotermicznej jest zależnością prostoliniową w badanym przedziale temperatur 0°C + 20°C w początkowym okresie hydratacji (pierwszych 7 dniach).

Tablica 1. Właściwości fizyczne oraz skład chemiczny cementów użytych do badań
 Table 1. Physical characteristics and chemical composition of cements used in study

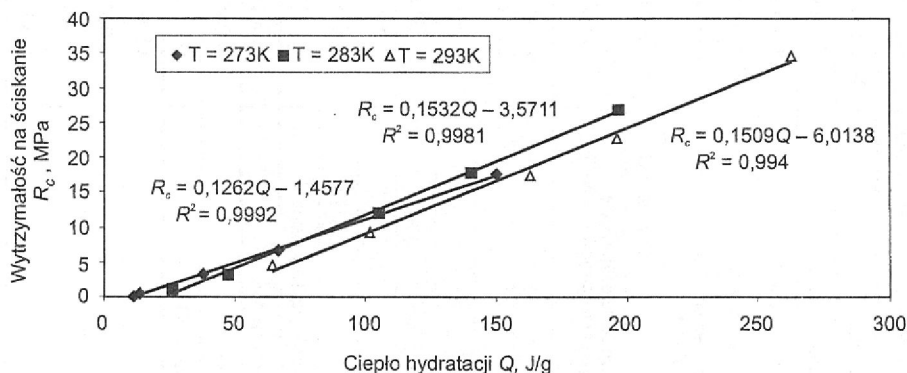
Oznaczenie	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 MSR	CEM I 42,5 HSR	CEM I 32,5 R	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 32,5 R	
Początek wiązania	180 min	165 min	140 min	190 min	190 min	180 min	
Koniec wiązania	280 min	270 min	240 min	440 min	500 min	490 min	
Powierzchnia właściwa	3330 cm ² /g	3000 cm ² /g	3040 cm ² /g	3500 cm ² /g	3540 cm ² /g	4370 cm ² /g	
Wytrzymałość na ściskanie	po 2 dniach	27,50 MPa	19,20 MPa	18,00 MPa	23,10 MPa	19,30 MPa	30,50 MPa*
	po 28 dniach	51,20 MPa	46,00 MPa	47,00 MPa	47,80 MPa	47,50 MPa	48,60 MPa
Ilość wody do osiągnięcia konsystencji normowej (PN-EN 480-1)	26,60%	25,50%	25,20%	28,10%	30,80%	31,70%	
CaO	65,51%	64,20%	64,73%	63,10%	57,10%**	50,50%**	
SiO ₂	20,68%	20,80%	21,50%	20,80%	22,00%**	23,90%**	
Al ₂ O ₃	5,80%	4,80%	4,60%	5,10%	6,00%**	6,50%**	
Fe ₂ O ₃	2,09%	4,30%	5,60%	3,60%	3,60%**	5,20%**	
MgO	0,73%	1,60%	0,98%	2,30%	2,60%**	3,70%**	
SO ₃	3,01%	2,60%	2,10%	2,10%	1,72%**	2,06%**	
Części nierozpuszczalne	1,31%	0,30%	0,30%	0,20%	1,16%**	0,90%**	
Straty prażenia	1,00%	0,80%	0,90%	1,10%	1,75%**	2,15%**	
Chlorki	0,03%	0,07%	0,003%	0,01%	0,06%**	0,09%**	
Alkalia Na ₂ O eq.	0,72%	0,40%	0,52%	0,70%	1,15%**	0,97%**	
C ₃ S	68,9%	59,70%	57,40%	54,90%	54,90%***	54,90%***	
C ₂ S	3,90%	17,10%	17,80%	18,00%	18,00%***	18,00%***	
C ₃ A	11,80%	5,50%	2,70%	7,40%	7,40%***	7,40%***	
C ₄ AF	6,40%	13,00%	17,00%	10,90%	10,90%***	10,90%***	
* Wytrzymałość po 7 dniach; ** zawartości oznaczone w cemencie; *** skład mineralogiczny użytego do produkcji cementu							



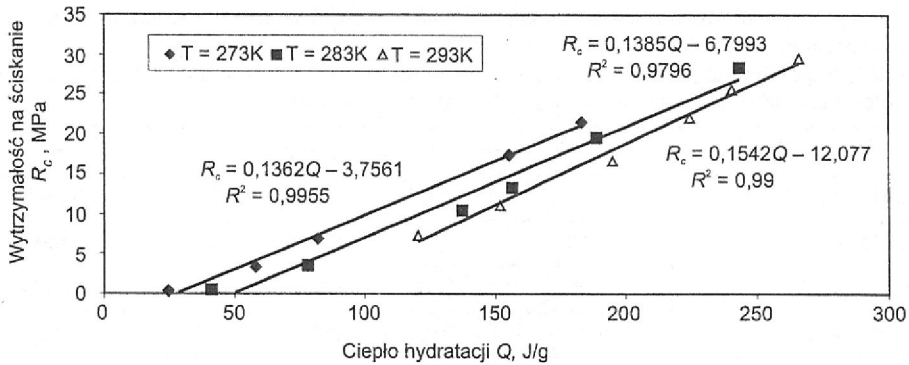
Rys. 3. Zależność $R_c = f(Q)$; CEM I 42,5 R; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273 K + 293 K$)
 Fig. 3. Correlation $R_c = f(Q)$; CEM I 42,5 R; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273 K + 293 K$)



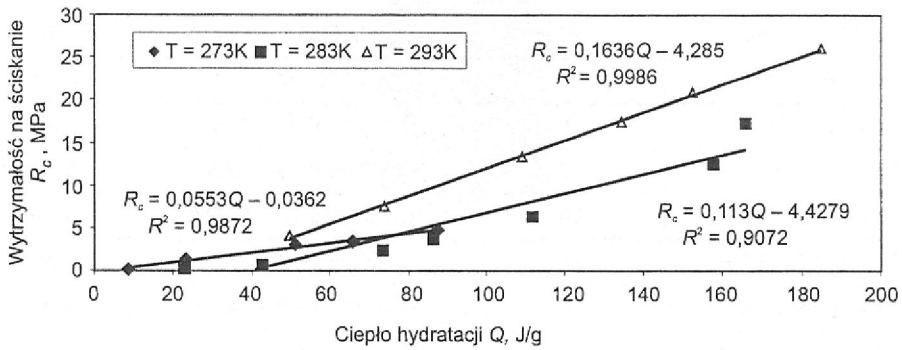
Rys. 4. Zależność $R_c = f(Q)$; CEM I 42,5 HSR; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273 K + 293 K$)
 Fig. 4. Correlation $R_c = f(Q)$; CEM I 42,5 HSR; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273 K + 293 K$)



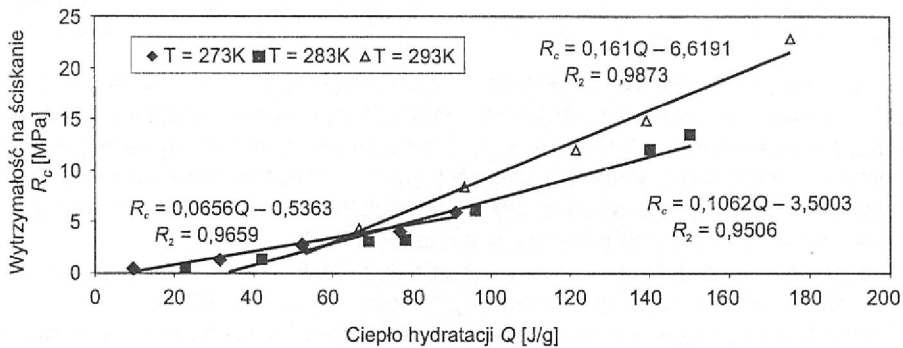
Rys. 5. Zależność $R_c = f(Q)$; CEM I 42,5 MSR; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273 K + 293 K$)
 Fig. 5. Correlation $R_c = f(Q)$; CEM I 42,5 MSR; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273 K + 293 K$)



Rys. 6. Zależność $R_c = f(Q)$; CEM I 32,5 R; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273K + 293K$)
 Fig. 6. Correlation $R_c = f(Q)$; CEM I 32,5R; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273K + 293K$)



Rys. 7. Zależność $R_c = f(Q)$; CEM III/B-S 32,5 R; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273K + 293K$)
 Fig. 7. Correlation $R_c = f(Q)$; CEM III/B-S 32,5 R; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273K + 293K$)



Rys. 8. Zależność $R_c = f(Q)$; CEM III/A 32,5 NA; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273K + 293K$)
 Fig. 8. Correlation $R_c = f(Q)$; CEM III/A 32,5 NA; $T = 0^\circ C + 20^\circ C$ ($T = 273K + 293K$)

Tablica 2. Doświadczalne zależności wytrzymałości na ściskanie zapraw normowych i zapraw z domieszkami od ilości wydzielonego ciepła hydratacji
 Table 2. Experimental correlations between compressive strength of standard mortars and mortars incorporating admixtures and the amount of hydration heat evolved

Cement	$T, ^\circ\text{C}$	Równanie	R^2
CEM I 42,5 R	0	$R_c = 0,1089 Q - 6,1114$	0,9979
CEM I 42,5 R	10	$R_c = 0,1407 Q - 5,8642$	0,9986
CEM I 42,5 R	20	$R_c = 0,1364 Q - 9,0420$	0,9782
CEM I 42,5 HSR	0	$R_c = 0,0989 Q - 3,2728$	0,9973
CEM I 42,5 HSR	10	$R_c = 0,1398 Q - 7,9965$	0,9945
CEM I 42,5 HSR	20	$R_c = 0,1480 Q - 9,6147$	0,9979
CEM I 42,5 MSR	0	$R_c = 0,1262 Q - 1,4577$	0,9992
CEM I 42,5 MSR	10	$R_c = 0,1532 Q - 3,5711$	0,9981
CEM I 42,5 MSR	20	$R_c = 0,1509 Q - 6,0138$	0,9940
CEM I 32,5 R	0	$R_c = 0,1362 Q - 3,7561$	0,9955
CEM I 32,5 R	10	$R_c = 0,1385 Q - 6,7993$	0,9796
CEM I 32,5 R	20	$R_c = 0,1542 Q - 12,0770$	0,9900
CEM II/B-S 32,5 R	0	$R_c = 0,0553 Q - 0,0362$	0,9872
CEM II/B-S 32,5 R	10	$R_c = 0,1130 Q - 4,4279$	0,9072
CEM II/B-S 32,5 R	20	$R_c = 0,1636 Q - 4,2850$	0,9986
CEM III/A 32,5 R	0	$R_c = 0,0656 Q - 0,5363$	0,9659
CEM III/A 32,5 R	10	$R_c = 0,1062 Q - 3,5003$	0,9506
CEM III/A 32,5 R	20	$R_c = 0,1610 Q - 6,6191$	0,9873

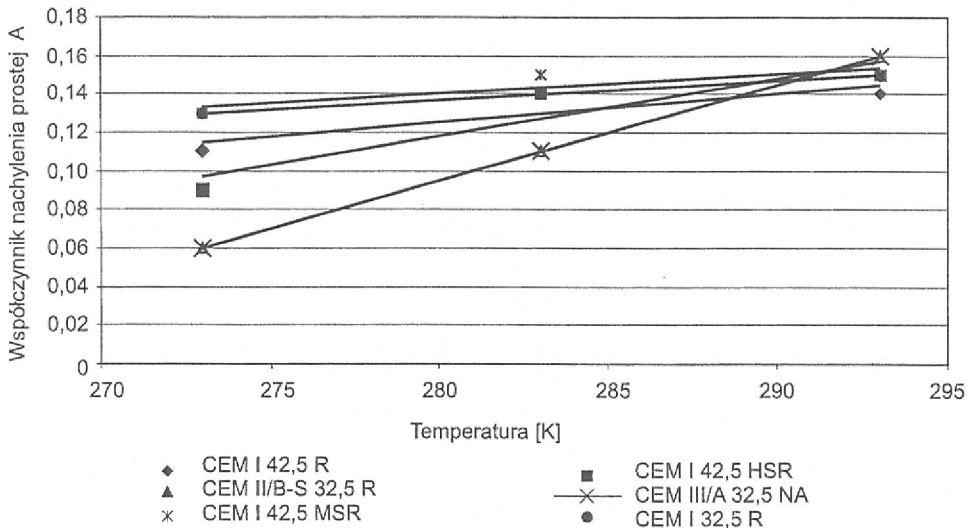
Wszystkie przedstawione wyniki badań dowodzą, że zależność przyrostu wytrzymałości zaprawy normowej w funkcji ilości wydzielonego ciepła hydratacji w badanym przedziale temperatur od 0°C do 20°C w okresie pierwszych 7 dni hydratacji wykazuje zależność prostopadłą. Współczynniki nachylenia prostych tej zależności przy różnych zaprawach normowych zawierają się w przedziale wartości $0,06 \div 0,16$ i zostały zestawione w tablicy 3 oraz przedstawione na rysunku 9.

Niezależnie od badanych cementów rośnie wartość tangensa kąta nachylenia równania regresji $R_c = f(Q)$ wraz ze wzrostem temperatury ($0^\circ\text{C} \div 20^\circ\text{C}$).

Cementy z dodatkami wykazują większy wzrost wartości współczynnika w równaniu regresji ze wzrostem temperatury, co może być potwierdzeniem udziału składników pucolanowych w procesie narastania wytrzymałości cementów CEM II i CEM III już w początkowym okresie hydratacji.

Tablica 3. Zestawienie wartości tangensa kąta nachylenia w równaniu funkcji $R_c = f(Q)$
 Table 3. Specification of values of gradient tangent in the equation of function $R_c = f(Q)$

Temperatura °C	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 HSR	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 32,5 R	CEM I 42,5 MSR	CEM I 32,5 R
0	0,11	0,09	0,06	0,06	0,13	0,13
10	0,14	0,14	0,11	0,11	0,15	0,14
20	0,14	0,15	0,16	0,16	0,15	0,15



Rys. 9. Wartości współczynnika a równania prostej zależności $R_c(t_i) = a Q(t_i)$ w funkcji temperatury w przypadku badanych cementów

Fig. 9. The values of the coefficient a in the equation $R_c(t_i) = a Q(t_i)$ in function of temperature for the analyzed cements

Podsumowując powyższe rozważania należy stwierdzić, że znając zależność funkcji można obliczyć przewidywaną wytrzymałość zaprawy dojrzewającej w obniżonej temperaturze na podstawie oznaczonego ciepła hydratacji metodą kalorymetrii izotermicznej, podstawiając odpowiednie wartości do równania regresji

$$R_c(t_i) = a Q(t_i) - b \quad (4)$$

gdzie: $R_c(t_i)$ – wytrzymałość na ściskanie zaprawy, MPa, po czasie (t_i) dojrzewania w określonej temperaturze,

a – współczynnik proporcjonalności, MPa·g/J – stała doświadczalna wyrażająca przyrost wytrzymałości na ściskanie na jednostkę ciepła hydratacji,

- $Q(t_i)$ – ilość wydzielonego ciepła hydratacji, J/g, w temperaturze dojrzewania po czasie (t_i),
 b – stała doświadczalna, MPa, w przypadku cementów CEM I – 7,2, a przy CEM II – 3,0 i CEM III – 3,4.

Otrzymane wyniki badań własnych potwierdzają przedstawione przez S. Peukerta [14] i innych autorów [15, 16] wnioski, że badana zależność wytrzymałości od ilości wydzielonego ciepła jest liniowa, nie zaś wykładnicza, uzyskana w pracach [4] i [17]. Przypuszczalnie różnice te powstały wskutek zastosowania różnych metod pomiarowych. S. Peukert i M. Venuat [14, 15] opisują wyniki uzyskane za pomocą kalorymetrii nie izotermicznej i nie adiabatycznej (metoda zgodna z normową [20], [21]), M. Kaszyńska natomiast w badaniach stosowała kalorymetrię adiabatyczną w zakresie temperatur od 8°C do 35°C na początku procesu, a nawet do 80°C na końcu badania.

5. Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników badań i danych literaturowych można sformułować następujące wnioski:

1. Zależność wczesnych wytrzymałości zapraw cementowych od ilości wydzielonego ciepła hydratacji jest prostoliniowa, opisana równaniem regresji $R_c(t_i) = a Q(t_i) - b$.
2. W zakresie temperatur 0°C + 20°C wartość współczynnika a w równaniu regresji (4) w przypadku wszystkich badanych cementów zawiera się w przedziale 0,16 ÷ 0,06; cementów zaś rodzaju CEM I – 0,15 ÷ 0,09.
3. W odniesieniu do cementów rodzaju CEM I klasy R współczynnik równania a wykazuje mniejszą czułość na zmiany temperatury (rys. 9).
4. Większy wzrost wartości współczynnika a w równaniu regresji (4) przy wzroście temperatury od 0°C do 20°C występuje w przypadku cementów z dodatkami 0,06 ÷ 0,16 (CEM II i CEM III) (rys. 9). Wzrost ten może świadczyć o wzroście reaktywności nieklinkierowych składników cementu wraz ze wzrostem temperatury.

Podziękowanie

Wyrażam podziękowanie mojemu promotorowi prof. dr hab. inż. Lechowi Czarneckiemu za życzliwe uwagi i pomoc w trakcie przygotowania i obrony pracy doktorskiej.

Bibliografia

- [1] Jamroży Z.: Beton i jego technologie. PWN, Warszawa 2000
- [2] Copeland L.E., Kantro D.L., Verbeck G.: Chemistry of Hydration of Portland Cement. 4-th ICCI Washington, Washington 1960 t. 1, s. 429–465
- [3] Ronin V., Jonasson J-E, Hedlund H.: Advanced modification technologies of the Portland cement based binders for different high performance applications. 10th ICCI Göteborg 1997, vol. 2, 2ii077, 8pp
- [4] Kaszyńska M.: Early age properties of high-strength/high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites* 24, (2002) s. 253–261
- [5] Rastrup E.: Heat of hydration in concrete, *Mag. Concr. Res.*, Sept.. 1954

- [6] Nykänen A.: Hardening of concrete at different temperatures, especially below the freezing point. RILEM Symposium, Kopenhaga 1956
- [7] Witakowski P: Termodynamiczna teoria dojrzewania. Zastosowanie do konstrukcji maszynych z betonu. Inżynieria Lądowa, z. 70, Politechnika Krakowska, 1998
- [8] Freiesleben-Hansen P., Pedersen J. E.: Maleinstrument til kontrol af betons haerdning. *Nordisk Betong*, 1, 1977, s. 21–25
- [9] Pane I., Hansen W.: Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions. *ACI Materials Journal*, November–December 2002, s. 534–543
- [10] Broda M., Wirquin E., Duthoit B.: Conception of an isothermal calorimeter for concrete – Determination of the apparent activation energy. *Materials and Structures*, vol. 35, August 2002, s. 389–394
- [11] Ng S. T. C., Shapiro G., Mak S. L.: Monitoring and Early Hydration of Cement Using Dielectric Spectroscopy. Fifth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, aci SP-200, 2001, s. 167–182
- [12] Sideris K., Sideris K. K.: The cement hydration equation and its application to several hydration criteria according to the literature. 10th ICCG Göteborg 1997, vol. 2, 2ii061, 11pp
- [13] Brandštetr J., Polcer J., Krátky J., Holeinský R., Havlica J.: Possibilities of the use of isoperibolic calorimetry for assessing the hydration behavior of cementation systems. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, s. 941–947
- [14] Peukert S.: Cementy powszechnego użytku i specjalne. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2000
- [15] Venuat M.: Cementy i bietony w stroitielstwie. Strojizdat, Moskwa 1980
- [16] Zaporozec I. D., Okorokov S. D., Paryjskij A. A.: Tieplowydelenije bietona. Izdatielstwo Literatury po Stroitelstwu, Leningrad 1966
- [17] Thielen G., Hintzen W.: Investigation of concrete behavior under restraint with a temperature-stress test machine. Thermal cracking in concrete at early ages. RILEM Proceedings 25, München 1994, s.145–152
- [18] Pinto R. C. A., Hobbs S. V., Hover K.C.: The Maturity Approach in Concrete Technology – Going Beyond Compressive Strength. Fifth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology aci SP-200, 2001, s. 749–768
- [19] Witakowski P., Czamarska D., Bobrowicz J.: Skomputeryzowany układ pomiarowy do pomiarów kalorymetrycznych. *Cement, Wapno, Beton*, z. 7, 1991
- [20] PrPN-B-19707 Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności. Zał. A: Oznaczenie ciepła hydratacji metodą semiadiabatyczną (prEN 196-9 – metoda wzorcowa)
- [21] BN-70/6731-13 Badanie ciepła hydratacji cementu

RELATION BETWEEN CEMENTS COMPRESSIVE STRENGTH AND THE AMOUNT OF HYDRATION HEAT EVOLVED IN LOW TEMPERATURES

Summary

In paper, the results of research and analysis of relation between the increase of compressive strength and amount of hydration heat evolved were presented. The research was carried out in isothermal conditions. Relations were studied in 3 temperatures: 20°C, 10°C and 0°C. The amount of hydration heat evolved by cement in a given temperature and the compressive strength of mortar

after the same period of hardening were compared. It was illustrated, that the increase of standard mortars strength in function of amount of hydration heat evolved during hydration process is the rectilinear function. The results of analysis have proved that application of isothermal calorimetry is useful for predicting the increase of cement compressive strength in low temperatures, for early hardening period.

Praca wpłynęła do Redakcji 23 VI 2005