

mgr inż. Aleksandra Mariak<sup>1\*)</sup>  
 prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilde<sup>1\*)</sup>

# Wyznaczanie wytrzymałości betonu na podstawie funkcji dojrzałości wg amerykańskiej normy ASTM C1074-11

*Estimating the strength of concrete based on the maturity function according to standards ASTM C1074-11*

DOI: 10.15199/33.2015.04.19

**Streszczenie.** Artykuł poświęcono wyznaczaniu wytrzymałości betonu na podstawie funkcji dojrzałości wg normy ASTM C1074-11 (ang. *Maturity Method*). Metoda bazuje na rejestracji zmian temperatury w trakcie hydratacji dojrzewającego betonu. W artykule zaprezentowano procedurę badawczą służącą wyznaczeniu funkcji dojrzałości dla wybranej mieszanki betonowej oraz zależności wytrzymałość-dojrzałość. Celem badań jest wyznaczanie zmian w czasie rzeczywistej wytrzymałości młodego betonu dojrzewającego w elementach konstrukcji. Metoda znajduje zastosowanie w trakcie prowadzenia robót betonowych w warunkach obniżonej temperatury, w trakcie wytwarzania elementów sprężanych lub betonowania niestandardowych elementów wielkogabarytowych. **Słowa kluczowe:** elementy betonowe, dojrzewanie betonu, wytrzymałość na ściskanie.

**Abstract.** This paper is devoted to assessment of concrete strength based on the maturity function according to US standards ASTM C1074-11 (Maturity Method). The procedure uses a continuous monitoring of temperature changes during the hydration process of curing concrete. The development of relationship strength-maturity is based on laboratory tests carried out on cubic and cylindrical specimens. The aim of the research is to estimate in-place concrete strength during construction process, which is particularly important for concrete works in low temperature conditions, production of prestressed concrete elements or massive concrete elements.

**Keywords:** concrete elements, concrete maturity, compressive strength.

W konstrukcjach betonowych i żelbetonowych wytrzymałość betonu jest określaną po 28 dniach naturalnego dojrzewania. Wynika to z faktu, że klasyczne cementy portlandzkie charakteryzowały się relatywnie wolnym przyrostem wytrzymałości w czasie, a za stan reprezentatywny dojrzałości betonu przyjmowało się stan, w którym zaszła już większość procesu hydratacji. W nowoczesnych cementach portlandzkich szybkość hydratacji jest znacznie większa, ponieważ mają one większą powierzchnię właściwą [1]. Znajomość zależności wytrzymałość – czas dojrzewania jest niezwykle istotna przy prowadzeniu robót w obniżonej temperaturze, betonowaniu na znacznej wysokości czy budowie niestandardowych, wielkogabarytowych konstrukcji żelbetonowych. Precyzyjna informacja o wytrzymałości betonu we wczesnym wieku pozwala na podjęcie decyzji o usunięciu deskowań lub podpór tymczasowych, rozpoczęciu procesu sprężania konstrukcji, a także przynosi korzyści związane z usprawnieniem produkcji w zakładach

prefabrykacji [1, 2, 3]. Celem artykułu jest przedstawienie eksperymentalnej weryfikacji procedury oceny wytrzymałości betonu wg ASTM C1074-11 [4, 5].

## Dojrzałość betonu

Wytrzymałość betonu rośnie wraz z postępem procesu hydratacji cementu, a szybkość hydratacji cementu wraz ze wzrostem temperatury. Zależność ta wskazuje na możliwość opisu zmian wytrzymałości jako funkcji uwzględniającej wpływ połączonych efektów czasu i temperatury [1]. Metoda szacowania wytrzymałości betonu bazuje na określeniu stopnia dojrzałości wyrażonego w postaci współczynnika temperaturowo-czasowego TTF (ang. *temperature-time factor*) lub jako wiek równoważny (ang. *equivalent age*) w określonej temperaturze referencyjnej, przyjmowanej najczęściej jako 20 °C. Opisanie zależności wytrzymałość-dojrzałość dla konkretnej receptury mieszanki betonowej wymaga przeprowadzenia badań laboratoryjnych zrealizowanych nie później niż 28 dni przed docelowym betonowaniem [4]. Na placu budowy należy rejestrować zmianę temperatury betonu w krytycznych miejscach konstrukcji od momentu wbudowania do osiągnięcia wymaganej wytrzymałości [4, 5]. Na podstawie krzywej uzyska-

nej z testów laboratoryjnych możliwe jest określenie wytrzymałości betonu dojrzewającego „in situ” w badanej konstrukcji.

## Funkcje dojrzałości

Wytrzymałość betonu jest funkcją jego wieku i temperatury. Zależność ta może być opisana funkcją sumacyjną zwaną dojrzałością, którą mierzy się w stopniodniach lub stopniogodzinach [1]. Zgodnie z ASTM C1074-11 istnieją dwie funkcje służące obliczeniu wskaźnika dojrzałości (ang. *maturity index*).

**Pierwsza procedura nazywana funkcją dojrzałości Nurse-Saul** służy do obliczenia wskaźnika temperatura-czas (TTF) zgodnie z równaniem [4, 5]:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t \quad (1)$$

gdzie:

$M(t)$  – wskaźnik temperatura-czas w wieku  $t$  (TTF) [°C – dni, °C – godziny];  
 $\Delta t$  – interwał czasu [dni, godziny];  
 $T_a$  – średnia temperatura betonu podczas przedziału czasowego  $\Delta t$  [°C];  
 $T_0$  – temperatura podstawowa [°C].

Temperaturę nalicza się powyżej temperatury podstawowej  $T_0$ , a więc temperatury, poniżej której ustaje proces hydratacji betonu oraz zachodzi bardzo powolny przyrost wytrzymałości w czasie. Jej wartość zależy od typu cementu, zastosowanych domieszek oraz zakresu temperatury

<sup>1)</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji: krzysztof.wilde@pg.gda.pl

dojrzewania betonu. Neville podaje, że jako temperaturę podstawową zwykle przyjmuje się  $T_0 = -10\text{ }^\circ\text{C}$ , co zostało potwierdzone w przypadku wieku betonu do 28 dni oraz przedziału temperatury  $0 \pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ . W przypadku wyższych temperatur  $T_0$  może być odpowiednio większa i należy ją wyznaczyć eksperymentalnie zgodnie z metodą zawartą w normie ASTM C1074-11 [4]. Założenia te znajdują potwierdzenie w pracy Carino [5], który dla funkcji Nurse-Saul, cementu typu I, bez domieszek, w zakresie temperatury od 0 do  $40\text{ }^\circ\text{C}$  rekomenduje temperaturę podstawową  $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$  [5].

**Druga funkcja opisująca dojrzałość bazuje na przeliczeniu przedziału pielęgnacji w określonej temperaturze na równoważny przedział wieku o przyjętej temperaturze, najczęściej  $T_s = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .** Funkcja wykorzystuje wykładnicze równanie Arheniusa, które uwzględnia wpływ temperatury na szybkość zachodzenia reakcji chemicznych. Wiek równoważny  $t_e$  wyznacza się zgodnie z równaniem [4, 5]:

$$t_e = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right)} \Delta t \quad (2)$$

gdzie:

$t_e$  – wiek równoważny w przyjętej temperaturze  $T_s$ , [dni, godziny];

$Q$  – energia aktywacji podzielona przez stałą gazową [K];

$T_a$  – średnia temperatura betonu podczas przedziału czasowego  $\Delta t$  [K];

$T_s$  – przyjęta temperatura [K];

$\Delta t$  – przedział czasowy [dni, godziny].

## Szacowanie wytrzymałości

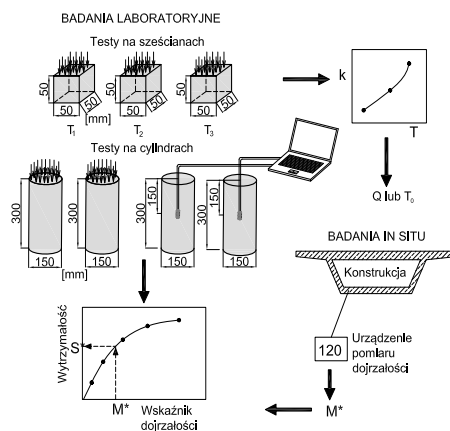
**Określenie zależności wytrzymałość-dojrzałość w badaniach laboratoryjnych.** Badania doświadczalne powinny być przeprowadzone na co najmniej 15 próbkach cylindrycznych o wymiarach  $150 \times 300\text{ mm}$  wykonanych z mieszanki betonowej odpowiadającej składem recepturze stosowanej na placu budowy. Po zabetonowaniu form cylindrycznych, w dwóch próbkach umieszcza się centrycznie wodo odporne czujniki pomiaru temperatury. Po usytuowaniu sensorów podłącza się je do systemu ciągłej rejestracji temperatury. Wszystkie cylindry należy przechowywać w wilgotnym pomieszczeniu bądź w kąpielu wodnej. Testy na ściskanie przeprowadza się każdorazowo na dwóch próbkach w wieku 1, 3, 7, 14 i 28 dni oraz oblicza ich średnią wytrzymałość [6]. Na każdym etapie dojrzewania oblicza się wskaźnik dojrzałości zgodnie z równaniem (1) lub (2). Jego znajomość i odpowiadającą mu wytrzymałość na ściskanie umożliwia wykreślenie najlepiej dopasowanej krzywej, co w rezultacie pozwala na oszacowa-

nie wytrzymałości mieszanki betonowej dojrzewającej w rzeczywistej konstrukcji.

Dokładność szacunkowej wytrzymałości zależy od wykorzystania odpowiedniej funkcji dojrzałości dla danej mieszanki betonowej. Nie ma jednej funkcji, której można użyć do wszystkich typów mieszanek [5]. Zastosowanie właściwej funkcji dojrzałości do danego betonu można uzyskać przez pomiar zmienności stałej przyrostu wytrzymałości  $k$  dla określonej temperatury twardnienia. Na podstawie tego parametru możliwe jest określenie temperatury podstawowej  $T_0$  i wartości energii aktywacji  $Q$ , które powinny być każdorazowo określone eksperymentalnie. W tym celu należy przygotować trzy zestawy próbek sześciennych wykonanych z zaprawy normowej, składające się z 18 kostek o boku  $50\text{ mm}$ . Każdy zestaw próbek dojrzewa w kąpielu wodnej o określonej temperaturze  $T_1, T_2, T_3$ , przy czym temperatura  $T_1$  i  $T_3$  oznacza minimalną i maksymalną temperaturę mogącą wystąpić na placu budowy, natomiast  $T_2$  stanowi wartość pośrednią między dwoma skrajnymi wartościami temperatury. W przypadku każdego zestawu próbek określa się początkowy i końcowy czas wiązania. Gdy wiek betonu będzie dwukrotnie dłuższy od końcowego czasu wiązania, rozpoczyna się testy wytrzymałości na ściskanie. Kolejne badania przeprowadza się każdorazowo na trzech kostkach w wieku, który jest ok. 2 razy większy niż wiek poprzedniego testu [4, 7]. Informacja o wytrzymałości na ściskanie kostek zaprawy dojrzewających w różnej temperaturze umożliwia wykreślenie wielu zależności, które pozwalają ustalić wartość poszukiwanej temperatury podstawowej  $T_0$  i energii aktywacji  $Q$  [4].

**Szacowanie wytrzymałości betonu na placu budowy.** Przed rozpoczęciem betonowania rzeczywistej konstrukcji należy szczegółowo zaplanować rozmieszczenie czujników pomiarowych i zabezpieczyć je przed uszkodzeniem w trakcie wykonywania wszelkich czynności budowlanych. Konieczne jest wskazanie szczególnie wrażliwych na temperaturę miejsc w konstrukcji, w których oszacowanie zmiany wytrzymałości w czasie jest istotne dla przebiegu procesu budowlanego. Po ułożeniu mieszanki betonowej w miejscu docelowym umieszcza się w młodym betonie czujniki temperatury i podłącza je do urządzenia rejestrującego temperaturę bądź do instrumentu pomiaru dojrzałości. W chwili, kiedy chcemy oszacować wytrzymałość betonu w konstrukcji, należy odczytać bądź obliczyć wartość wskaźnika dojrza-

łości, odnieść go do wcześniej wykreślonej krzywej i na tej podstawie wnioskować o rzeczywistej wartości wytrzymałości na ściskanie [4, 5]. Stosowanie takich procedur ogranicza niepewność co do wytrzymałości w okresach zmiennej temperatury, które mogą przypadkowo wystąpić nawet w zakładach prefabrykacji [1]. Opisaną procedurę badawczą przedstawiono na rysunku 1.



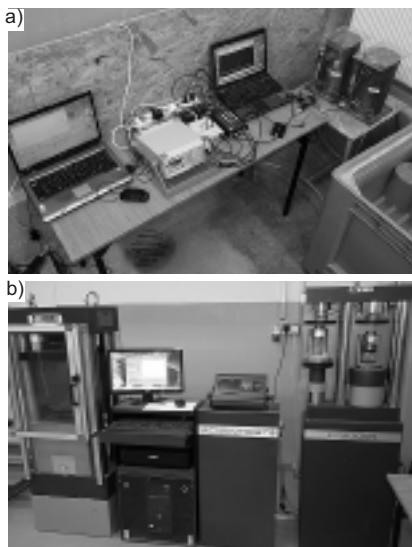
Rys. 1. Procedura maturity method

Fig. 1. The test procedure of maturity method

## Badania doświadczalne

Zakres badań eksperymentalnych składał się z jednocześnie prowadzonych testów na próbkach cylindrycznych oraz sześciennych. Obejmował pomiar czasu wiązania, testy wytrzymałościowe oraz ciągłą rejestrację temperatury dojrzewającego betonu w dwóch cylindrach (próbka A i B). W trakcie procesu twardnienia próbek pomiarowych A i B rejestrowano także sygnały propagacji ultradźwiękowej paczki falowej, które pozwoliły na rejestrację zmian prędkości propagującej fali. Intencją ich przeprowadzenia było wstępne sprawdzenie przydatności do oceny zaawansowania procesu hydratacji. Stanowisko badawcze przedstawiono na fotografii.

**Testy na próbkach sześciennych.** Przygotowano 3 zestawy po 18 próbek sześciennych (łącznie 54 próbki) wykonanych z zaprawy normowej wg PN-EN 196-1:2006. Każdy zestaw zanurzono w kąpielu wodnej o temperaturze odpowiednio  $T_1 = 23,6\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 30,2\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = 37,8\text{ }^\circ\text{C}$ . Za pomocą aparatu Vicata określono końcowy czas wiązania, który w przypadku temperatury wody  $T_1$  wynosił 5 h 55 min,  $T_2$  – 4 h 5 min, a  $T_3$  – 2 h 50 min. Zgodnie z wymaganiami normy ASTM C1074-11 badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na próbkach w wieku dwukrotnie dłuższym od końcowego czasu wiązania, np.



**Stanowisko badawcze: a) zestaw pomiarowy rejestracji temperatury, zestaw do wzbudzenia i odbioru propagacji fal ultradźwiękowych oraz zestaw wanien do przechowywania próbek w kąpeli wodnej o określonej temperaturze; b) maszyny wytrzymałościowe** [Fot. Autorzy]  
*Instrumentation setup: a) temperature recording device, measurement set for excitation and record of ultrasonic wave and water baths maintained at three different temperatures; b) strength machines*

w przypadku zestawu kostek przechowywanych w temperaturze  $T_2$  w wieku ok. 4 h, 8 h, 16 h, 32 h, 64 h, 128 h.

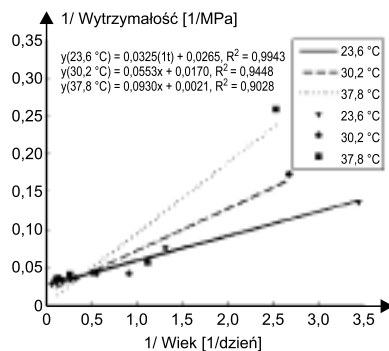
Załącznik A1 do normy ASTM C1074-11 [4] podaje trzy procedury wyznaczania temperatury podstawowej  $T_0$  oraz energii aktywacji  $Q$ . Pierwsze podejście polega na wykreśleniu zależności odwrotności wytrzymałości w funkcji odwrotności wieku pomniejszonego o końcowy czas wiązania. Następnie należy określić nachylenie i punkt przecięcia z osią  $y$  najlepiej dopasowanej prostej dla każdej temperatury twardnienia. Iloraz punktu przecięcia z osią  $y$  do nachylenia prostej jest poszukiwaną wartością  $k$ , która dla przyjętych danych (rysunek 2) wynosi:  $k_{T_1} = 0,816$  1/dzień,  $k_{T_2} = 0,308$  1/dzień,  $k_{T_3} = 0,023$  1/dzień.

Alternatywna procedura wyznaczenia stałej przyrostu  $k$  polega na wpasowaniu krzywej hiperbolicznej najlepiej dopasowanej do danych uzyskanych z badań doświadczalnych (wytrzymałości średniej  $S$  i wieku  $t$ ). Program komputerowy wylicza stałe regresji  $S_u$ ,  $t_0$  i  $k$ , wykorzystując zależność [4]:

$$S = S_u \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (3)$$

gdzie:

$S$  – średnia kostkowa wytrzymałość na ściskanie w wieku  $t$  [MPa];  
 $t$  – wiek [dzień];



**Rys. 2. Odwrotność wytrzymałości w funkcji odwrotności wieku pomniejszonego o końcowy czas wiązania**

*Fig. 2. Reciprocal of strength versus reciprocal of age beyond time of final setting*

$S_u$  – graniczna wytrzymałość na ściskanie [MPa];  
 $t_0$  – wiek, kiedy rozpoczyna się rozwój wytrzymałości [dzień];  
 $k$  – stała przyrostu [1/dzień].

Na rysunku 3 zaprezentowano zmianę wytrzymałości w czasie próbek sześciennych dojrzewających w różnej temperaturze. W przypadku kostek przechowywanych w temperaturze wody  $T_1 = 23,6$  °C, równanie krzywej hiperbolicznej ma postać:

$$S(T_1) = 37,853 \frac{0,965(t - 0,435)}{1 + 0,965(t - 0,435)} \quad (4)$$

Współczynnik determinacji wynosi  $R^2(T_1) = 0,9966$ . Dla temperatury  $T_2 = 30,2$  °C równanie przyjmuje postać:

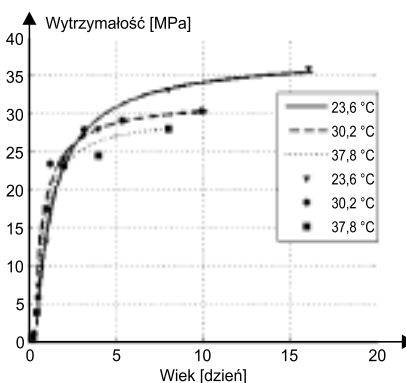
$$S(T_2) = 31,960 \frac{1,906(t - 0,316)}{1 + 1,906(t - 0,316)} \quad (5)$$

Współczynnik  $R^2(T_2) = 0,9662$ , natomiast dla najwyższej wartości temperatury  $T_3 = 37,8$  °C, równanie krzywej hiperbolicznej przedstawia zależność:

$$S(T_3) = 30,121 \frac{2,112(t - 0,445)}{1 + 2,112(t - 0,445)} \quad (6)$$

Współczynnik determinacji  $R^2(T_3) = 0,9970$ .

Trzeci sposób wyznaczania stałej przyrostu  $k$  dla każdej temperatury twardnie-



**Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu dla każdej temperatury twardnienia**

*Fig. 3. Strength-age data for each curing temperature*

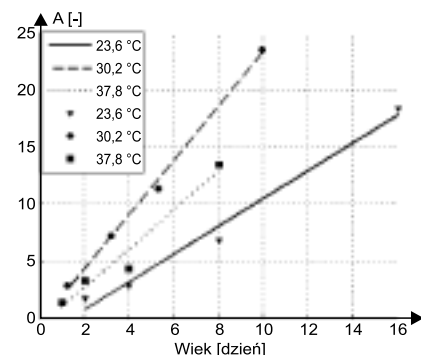
nia przebiega zgodnie z następującymi krokami:

a) korzystając z danych wytrzymałości – wiek dla czterech ostatnich testów należy je przedstawić w relacji odwrotność wytrzymałości (oś  $y$ ) i odwrotność wieku (oś  $x$ ). Następnie przeprowadza się aproksymację liniową i określa punkt przecięcia prostej z osią  $y$ . Odwrotność wartości stanowiącej punkt przecięcia z osią  $y$  jest poszukiwaną wytrzymałością graniczną  $S_u$ ;

b) posługując się danymi z podpunktu a) oblicza się wartości  $A$  dla każdej wytrzymałości średniej, zgodnie z równaniem:

$$A = \frac{S}{(S_u - S)} \quad (7)$$

c) dla każdej temperatury twardnienia należy wykreślić wartości  $A$  w funkcji czasu (rysunek 4), a następnie określić nachylenie najlepiej dopasowanej linii prostej. Wartość nachylenia stanowi poszukiwaną stałą przyrostu  $k$ .



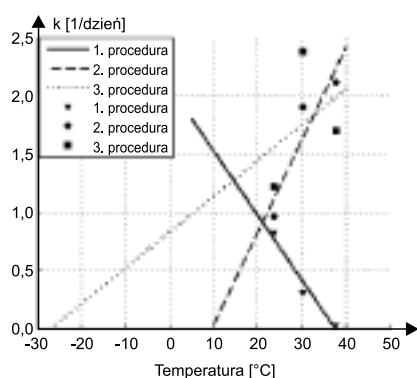
**Rys. 4. Współczynnik  $A$  w funkcji wieku dla czterech ostatnich testów wytrzymałościowych**

*Fig. 4. Value of  $A$  versus age for each last four strength*

Wytrzymałość graniczna  $S_u$  dla temperatury  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  wynosi odpowiednio 38,022 MPa, 31,770 MPa oraz 30,193 MPa. Znając jej wartość, można wyznaczyć krzywe zależności wartości  $A$  od wieku dojrzewających kostek. Nachylenie otrzymanych prostych stanowi wartość stałych przyrostu, które wyniosły odpowiednio:  $k_{T_1} = 1,215$ /dzień,  $k_{T_2} = 2,379$ /dzień,  $k_{T_3} = 1,696$ /dzień.

W badaniach eksperymentalnych, przedstawionych w artykule, wartości parametru  $k$  wyznaczone za pomocą trzech różnych procedur były rozbieżne. W celu sprawdzenia poprawności otrzymanych wyników na rysunku 5 wykreślono trzy proste służące ustaleniu wartości temperatury podstawowej  $T_0$ . Punkt przecięcia prostej z osią temperatury stanowi wartość poszukiwanej temperatury  $T_0$ , która zgodnie z proce-





Rys. 5. Wartości  $k$  w funkcji temperatury twardnienia

Fig. 5. Example of  $k$ -values versus curing temperature

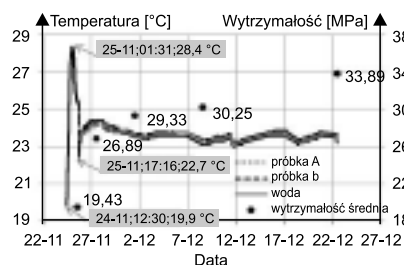
durą pierwszą wynosi  $37,44\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $R^2 = 0,96$ ), wg procedury drugiej  $9,62\text{ }^{\circ}\text{C}$  (współczynnik  $R^2 = 0,85$ ), natomiast zgodnie z trzecim podejściem  $-26,78\text{ }^{\circ}\text{C}$  (współczynnik  $R^2 = 0,14$ ). Za wiarygodną wartość parametru  $T_0$  przyjęto temperaturę wyznaczoną zgodnie z drugą procedurą i dla tej wartości wykreślono zależność  $\ln(k)$  w funkcji odwrotności temperatury podanej w kelwinach. Wynik aproksymacji liniowej stanowi prosta, której wartość ujemnego nachylenia jest równa energii aktywacji  $Q = 5022,1\text{ K}$ . Wyznaczona w ten sposób energia aktywacji umożliwia wykreślenie funkcji dojrzałości zgodnie z równaniem (2).

#### Testy na próbkach cylindrycznych.

Badania prowadzono na 15 próbkach. Wszystkie cylindry zabetonowano i zagęszczono na stoliku wibracyjnym o godz. 12.30 24 listopada 2014 r. Wskaźnik w/c mieszanki wynosił w/c = 0,5, opad stożka 8 cm, a zawartość powietrza 1,9%. W dwóch cylindrach (próbka A i B), w świeżej mieszance umieszczono czujniki pomiaru temperatury. Próbkę dojrzewały na stole laboratoryjnym. Po 24 h (25-11-2014, 13:00) przeprowadzono pierwsze testy na ściskanie na trzech próbkach i obliczono ich średnią wytrzymałość. Pozostałe 12 cylindrów (10 bez czujników i 2 próbki z czujnikami) zanurzono w kąpielii wodnej o temperaturze ok.  $23,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (godz. 17.00 25 listopada). Zestaw pomiaru temperatury wzbogacono o kolejny czujnik rejestrujący zmianę temperatury wody. Kolejne testy na ściskanie wykonano po 3, 7, 14, 28 dniach. Historię zmian temperatury i wytrzymałości w czasie przedstawiono na rysunku 6.

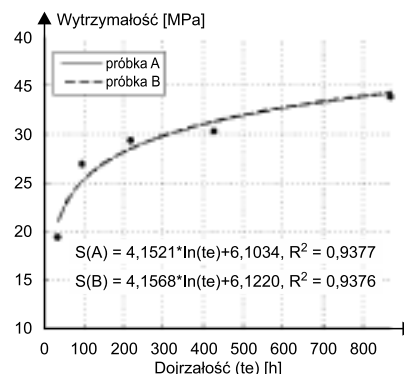
Na podstawie zarejestrowanych zmian temperatury, przyjętej temperatury  $T_s = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , wyznaczonej temperatury podstawowej  $T_0 = 9,62\text{ }^{\circ}\text{C}$  i energii aktywacji  $Q = 5022,1\text{ K}$

obliczono wskaźniki dojrzałości zgodnie z funkcjami opisanymi równaniami (1) i (2). Rezultatem przeprowadzonych badań laboratoryjnych jest wykreślenie krzywych logarytmicznych obrazujących zmianę wytrzymałości betonu w funkcji dojrzałości TTF i  $t_e$  (rysunek 7). Krzywe te stanowią narzędzie do szacowania wytrzymałości młodego betonu dojrzewającego w konstrukcji.



Rys. 6. Wykres zmian temperatury i wytrzymałości w funkcji czasu

Fig. 6. Temperature and strength history



Rys. 7. Wytrzymałość w funkcji dojrzałości wyrażonej w postaci wieku równoważnego  $t_e$

Fig. 7. Plot of a relationship between compressive strength and equivalent age at  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

#### Wnioski

Przedstawione badania stanowią wprowadzenie do metody służącej szacowaniu wytrzymałości betonu w rzeczywistej konstrukcji budowlanej na podstawie monitoringu zmian temperatury młodego betonu.

W przypadku znanej historii termicznej betonu przepisy ASTM C1074-11 pozwalają na wyznaczenie i zastosowanie funkcji dojrzałości danej mieszanki betonowej. Aby zastosować poprawną funkcję, należy jednak posiadać wiedzę o ograniczeniach tej metody i przyjętych uproszczeniach.

Zestawienie trzech procedur wyznaczenia stałej przyrostu wykazało, że do analizowania danych wytrzymałość-wiek zalecana jest hiperboliczna zależność opisana równaniem (3). Wynika to z faktu, że liniowa zależność między wytrzymałością a dojrzałością ma miejsce tylko powyżej pewnego „minimum” dojrzałości.

Badania potwierdziły, że zakres temperatury, w jakim beton dojrzewa, ma duży wpływ na wartość temperatury podstawowej  $T_0$ , a w efekcie także na przebieg krzywej wytrzymałość – dojrzałość. W prowadzonych badaniach kostki sześciennie dojrzewały w temperaturze  $T_1 = 23,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 30,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3 = 37,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zaś temperatura  $T_0$  wynosiła  $9,62\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Otrzymana wartość znajduje potwierdzenie w pracach Neville'a i Carino, którzy dowodzą, że w przypadku betonów dojrzewających w wyższej temperaturze  $T_0$  jest odpowiednio większa i należy ją wyznaczać eksperymentalnie. Istotny wpływ na rezultaty badań ma dokładność prowadzonych prac, a w szczególności: jakość wykonania form sześciennych o boku 50 mm, właściwe określenie czasu wiązania, utrzymanie stałej temperatury kąpielii wodnych, a także przeprowadzenie testów na ściskanie w ściśle określonym wieku i ze stałą prędkością przyrostu obciążenia. Prawidłowe stosowanie tej relatywnie prostej procedury może przynieść znaczne oszczędności kosztów inwestycji budowlanej. Znajomość rzeczywistej wytrzymałości młodego betonu dojrzewającego w konstrukcji umożliwia elastyczne planowanie prac budowlanych, zwiększa bezpieczeństwo wykonywanych prac, ułatwia podejmowanie właściwych decyzji dotyczących terminu sprężania elementów betonowych, a także pozwala zwiększyć tempo produkcji prefabrykatów i usprawnić kontrolę jakości.

#### Literatura

- [1] Neville A.M., Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków, 2000.
- [2] Ajdukiewicz A., Mames J., Konstrukcje z betonu sprężonego, Polski Cement, Kraków, 2004.
- [3] Moczko A., Nowoczesne metody nieniszczącej kontroli wytrzymałości dojrzewającego betonu, Polski Cement, numer specjalny, maj 2002, s. 35 – 37.
- [4] ASTM C1074 – 11, Practice for Estimating Strength by the Maturity Method, ASTM Standards Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA.
- [5] Carino N.J., Lew H.S.: The Maturity Method: From Theory to Application, Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor, 2001, 19 p.
- [6] ASTM C39/C39M – 04a, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM Standards Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA.
- [7] ASTM C109 / C109M – 07, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM Standards Vol. 04.01, ASTM, West Conshohocken, PA.

Otrzymano 22.03.2015 r.