

Funkcja dojrzałości – narzędzie śledzenia aktualnej wytrzymałości betonu

1. Potrzeba wiedzy o aktualnej wytrzymałości dojrzewającego betonu w konstrukcji

Potrzeba posiadania wiedzy o postępie osiągania przez dojrzewający beton określonych w specyfikacji (projekcie) właściwości wynika z konieczności podejmowania istotnych decyzji technologicznych procesu wznoszenia budowli. Najbardziej wyraziste są te decyzje, które związane są z usuwaniem deskowań formujących elementy konstrukcyjne, bądź podpierających je rusztowań. Są też najważniejsze z punktu widzenia bezpieczeństwa prowadzenia robót, ale także ostatecznego bezpieczeństwa konstrukcji. Przedwczesne rozdeskowanie lub usunięcie podpór może doprowadzić do uszkodzenia elementu lub jego nadmiernych nieodwracalnych odkształceń. Do tych decyzji potrzebna jest wiedza o aktualnej, rzeczywistej wytrzymałości materiału konstrukcyjnego.

Mniej wyraziste decyzje w trakcie wykonawstwa dotyczą nadzoru nad właściwą pielęgnacją. Są one mniej wyraziste, bo ten aspekt technologiczny jest wciąż najczęściej pomijany ogniwem w procesie realizacji robót betonowych [1]. Pomijam, gdyż efekt zaniechania nie zawsze jest widoczny natychmiast – np. poprzez brak wystarczającej wytrzymałości. Wpływa natomiast zdecydowanie na trwałość konstrukcji, która jest efektem prawidłowego ukształtowania struktury materiału dzięki prawidłowo przebiegającym procesom hydratacji spoiwa. Ma je zapewnić właściwa pielęgnacja i ochrona dojrzewającego betonu, którą definiuje norma PN-EN 13670 [2]. Realizuje się to poprzez dobór odpowiedniej do warunków i rodzaju konstrukcji metody pielęgnacji oraz czasu jej trwania. Czas trwania pielęgnacji uzależniony jest od temperaturowych warunków dojrzewania betonu i zdeterminowany jest w normie poprzez osiągnięcie wymaganej dla danego stopnia pielęgnacji wytrzymałości betonu [1,2], która „reprezentuje” wiedzę o aktualnej strukturze betonu. Jest to w sumie parametr najłatwiejszy do ustalenia lub zmierzenia, ale... czy rzeczywiście taki łatwy?

2. Dojrzałość betonu

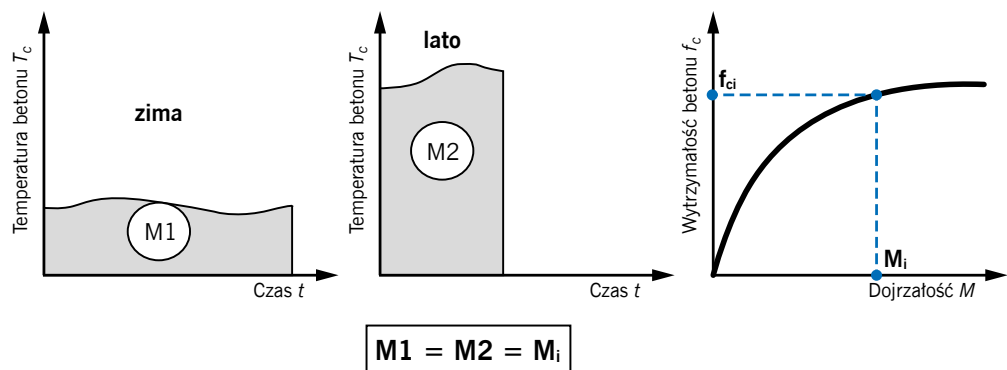
Reakcje hydratacji spoiwa w betonie w sposób istotny uzależnione są od temperatury. Temperatura odniesienia, dla której podawane są ogólne

informacje dotyczące tych zagadnień, to +20°C, czyli laboratoryjne warunki określania parametrów technicznych dla cementu czy betonu. Dotyczy to np. obligatoryjnie podawanej przez producenta cementu wytrzymałości wczesnej (2-dniowej lub 7-dniowej) oraz 28-dniowej. Cała procedura oceny zgodności (jak również ocena identyczności) podana w normie PN-EN 206 [3] opiera się o wyniki badań próbek betonu dojrzewających w warunkach laboratoryjnych. Na takich założeniach bazuje też informacja, która podawana jest wykonawcy przez producenta betonu, dotycząca rozwoju wytrzymałości betonu – „*Przy określaniu czasu pielęgnacji, informacje o rozwoju wytrzymałości betonu można podać albo według tablicy (...), albo w postaci krzywej rozwoju wytrzymałości betonu w temperaturze 20°C pomiędzy 2 a 28 dniem dojrzewania*” – p. 7.2 w normie [3]. Przywołana w powyższym zaleceniu tablica zestawia wartości wytrzymałości 2-dniowej betonu $f_{cm,2}$ oraz wytrzymałości 28-dniowej $f_{cm,28}$, które ustalone są na podstawie badań wstępnych, a one przeprowadzane są w warunkach laboratoryjnych. Wiadąc więc z powyższego, że „obligatoryjna” wiedza o możliwym postępie przyrostów wytrzymałości w trakcie dojrzewania ogranicza się do warunków laboratoryjnych lub im zbliżonych.

Tymczasem temperatura dojrzewającego betonu w elemencie z reguły jest odmienna od tej laboratoryjnej – w okresach letnich wyższa lub znacznie wyższa (np. w elementach masywnych). W okresach zimowych przeważnie niższa w strefach przypowierzchniowych, a często wyższa w środku uformowanego elementu, zwłaszcza masywnego. Jeśli relacja dotycząca wpływu zróżnicowanej temperatury na przyspieszenie bądź spowolnienie narastania wytrzymałości nie jest znana, to nie można w łatwy sposób ustalić aktualnej wytrzymałości na podstawie śledzenia zmian temperatury.

Pomocny okazuje się w tym przypadku parametr określany jako dojrzałość betonu, którego wykorzystanie opiera się na założeniu, że **dany beton o takiej samej dojrzałości posiada taką samą wytrzymałość, niezależnie od swojej historii temperaturowej od momentu wbudowania w konstrukcję** (rys. 1).

Rys. 1. Idea zastosowania funkcji dojrzałości



Do wyliczenia aktualnej dojrzałości betonu stosuje się mniej lub bardziej skomplikowane funkcje wynikające z nieustannie prowadzonych badań sięgających połowy ubiegłego wieku [4]. Generalnie prowadzą one do wyliczenia wskaźnika temperaturowo-czasowego (wskaźnika dojrzałości) M lub równoważnego wieku betonu t_e . Na ich podstawie z kolei wylicza się aktualną wytrzymałość dojrzewającego betonu. Funkcja odzwierciedlająca charakterystykę temperaturowo-czasową po czasie dojrzewania betonu t , znana jako funkcja dojrzałości Nurse'go-Saula, może być przedstawiona w następującej postaci [4,5]:

$$M = \sum_0^t (T_c - T_0) \cdot \Delta t \quad (1)$$

gdzie:

M – wskaźnik temperaturowo-czasowy betonu (dojrzałość betonu) [°C·h lub °C·dni]

T_c – średnia temperatura betonu w danym przedziale czasu [°C]

T_0 – temperatura odniesienia (zwykle przyjmowana jako 0°C lub -10 °C) [°C]

Δt – przedział czasowy pomiaru temperatury [h lub dni]

Drugim sposobem wyrażenia aktualnej dojrzałości betonu jest funkcja ustalająca równoważny wiek betonu [4,5]:

$$t_e = \sum_0^t \exp\left[-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \cdot \Delta t \quad (2)$$

gdzie:

t_e – równoważny wiek betonu w określonej temperaturze odniesienia (najczęściej przyjmuje się +20°C) [h lub dni]

E – energia aktywacji wyznaczana laboratoryjnie [J/mol]

R – uniwersalna stała gazowa ($R = 8,314$ [J/mol·K])

T – średnia absolutna temperatura betonu w danym przedziale czasu Δt [K]

T_0 – absolutna temperatura odniesienia (zwykle przyjmuje się 293 [K], czyli warunki laboratoryjne) [K]

Δt – przedział czasowy pomiaru temperatury [h lub dni]

Dzięki temu równaniu (2) rzeczywisty wiek betonu jest przetwarzany na wiek równoważny betonu dojrzewającego w temperaturze odniesienia wynoszącej +20°C. Pewną wadą tej procedury jest konieczność laboratoryjnego wyznaczenia w ramach wcześniejszych badań energii aktywacji dla danej receptury be-

Tablica 1. Schemat działań przy praktycznym użyciu funkcji dojrzałości

Kolejność działań	Zadania do wykonania	Wymierny efekt działań
krok 1	Badania laboratoryjne	Zależność między wytrzymałością betonu i dojrzałością $f_c = f(M)$
krok 2	Rejestracja temperatury dojrzewającego betonu	Historia temperaturowa dojrzewającego betonu
krok 3	Obliczenia: Obróbka danych przy zastosowaniu równania (1) lub (2)	Wskaźnik dojrzałości M lub równoważny wiek betonu t_e
krok 4	Obliczenia: Wykorzystanie wyznaczonej relacji między wytrzymałością a dojrzałością $f_c = f(M)$	Aktualna wytrzymałość betonu w konstrukcji f_c

tonu. Jeśli wykorzystana do tego dane literaturowe, mogą one powodować znaczące błędy w interpretacji wyników w ramach bieżącej kontroli przyrastania wytrzymałości betonu wbudowanego w konstrukcję.

3. Szacowanie aktualnej wytrzymałości dojrzewającego betonu przy użyciu funkcji dojrzałości

Ustalenie aktualnej wytrzymałości betonu w dojrzewającym elemencie przy użyciu metody dojrzałości składa się z następujących czynności (tab. 1):

1. ustalenie zależności pomiędzy dojrzałością a wytrzymałością betonu na podstawie badań laboratoryjnych,
2. ciągła rejestracja temperatury dojrzewającego betonu w elemencie konstrukcyjnym, począwszy od momentu wbudowania mieszanki betonowej,
3. wyliczenie wskaźnika dojrzałości dla dojrzewającego betonu (wg równania 1) lub równoważnego wieku betonu (wg równania 2) na podstawie zarejestrowanej historii temperaturowej,
4. oszacowanie wartości aktualnej wytrzymałości betonu w elemencie na podstawie wyliczonej aktualnej dojrzałości betonu i znanej już zależności pomiędzy dojrzałością a wytrzymałością betonu.

Aby móc wykorzystać ustaloną na podstawie bieżących ciągłych pomiarów temperatury dojrzałość betonu według zasad przedstawionych w rozdz. 2 powyżej, konieczne jest jeszcze ustalenie zależności pomiędzy dojrzałością a wytrzymałością betonu. Powinna ona dotyczyć co najmniej przedziału czasowego istotnego ze względów projektowych konstrukcji, czyli czasu od wbudowania mieszanki betonowej do uzyskania przez beton normowej

Rys. 2. Ręczny pomiar temperatury dojrzewającego betonu



wytrzymałości. Jeśli specyfikacja nie przewiduje innych terminów osiągnięcia przez beton wytrzymałości projektowej, to domyślnie przyjmuje się wytrzymałość 28-dniową [3]. Próbki w tym badaniu powinny być wykonane i powinny dojrzewać w warunkach zgodnych z PN-EN 12390-2 [6]. Konieczne jest zatem wykonanie badań laboratoryjnych, w których jednocześnie określa się aktualną w danym momencie dojrzałość betonu oraz odpowiadającą jej aktualną wytrzymałość na ściskanie. Opis przeprowadzenia takiej procedury można znaleźć np. w normie ASTM 1074-98 [5], która proponuje wykonanie co najmniej 15 próbek z mieszanki betonowej przygotowanej według receptury przewidywanego do zastosowania betonu. Ważny jest przede wszystkim rodzaj i ilość użytego cementu, a także udział zastosowanych domieszek. Pomiar temperatury dokładnie w środku próbek przeprowadza się na co najmniej 2 próbkach. Najpopularniejszym, najprostszym i najtańszym sposobem wykonywania pomiarów temperatury wewnątrz próbek jest użycie termopar przygotowanych z bimetalicznego przewodu, zatopionych w formowanym elemencie, a następnie użycie odpowiedniego do zastosowanego materiału termopary czytnika temperatury (rys. 2 i 3). Można oczywiście stosować też bardziej zaawansowane technologicznie systemy do ciągłej, wielokanałowej rejestracji danych, w tym także gotowej aparatury przetwarzającej te dane w postaci np. gotowego raportu generującego aktualną wartość wskaźnika dojrzałości betonu, lub nawet wartość aktualnej wytrzymałości betonu. Norma [5] zaleca wykonanie badania wytrzymałości betonu w wieku 1, 3, 7, 14 i 28 dni, z użyciem każdorazowo 2 próbek. Jeśli wyniki odstają o więcej niż 10 % od wyliczonej średniej wartości, w badaniu należy użyć trzeciej próbki, a wynik będzie stanowił wtedy średnią z trzech próbek lub pozwoli na odrzucenie pojedynczego wyniku obciążonego dużym błędem. Odpowiednio do badania wytrzymałości, w każdym terminie należy wyliczyć aktualny wskaźnik dojrzałości [według wzoru (1) lub (2)], wykorzystując zarejestrowane temperatury dojrzewania (powinny być prawie stałe, z uwagi na wymagane laboratoryjne warunki dojrzewania próbek). Wynik powinien stanowić także średnią wartości wyliczonych z pomiarów temperatury w co najmniej dwóch

próbkach. Pojedyncze odczyty temperatury powinny być prowadzone przez pierwsze 48 godzin badania co 0,5 h, a w późniejszym okresie przedziały czasowe Δt mogą być wydłużone do 1,0 h.

Po uzyskaniu zestawu par wyników z badań wytrzymałości betonu i jego dojrzałości można je umieścić na wykresie zależności – wytrzymałość f_c od wskaźnika temperaturowo-czasowego M , lub wytrzymałość f_c od równoważnego wieku betonu t_e . Służą one do wrysowania najlepiej dopasowanej krzywej, która odzwierciedla dla danego betonu zależność wytrzymałość – dojrzałość. To ona służy później do ustalenia aktualnej wytrzymałości betonu dojrzewającego w innych warunkach temperaturowych, na podstawie wyliczonej w danej chwili wartości wskaźnika dojrzałości. Uzyskane wyniki mogą też posłużyć do określenia analitycznej postaci zależności wytrzymałość-dojrzałość. Na przykład Carino [4] przedstawia do wykorzystania zaproponowaną przez Plovmanna (rok 1956) najbardziej popularną, a przy tym prostą, postać krzywej:

$$f_c = a + b \cdot \log(M) \quad (3)$$

gdzie:

M – wskaźnik dojrzałości betonu.

Do szacowania wytrzymałości betonu w zależności od jego wieku przy średniej temperaturze dojrzewania (pielęgnacji) wynoszącej 20°C można zastosować zależność podaną przez Eurokod 2 [7]:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (4)$$

w której:

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[s \left(t - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] \quad (5)$$

gdzie:

$f_{cm}(t)$ – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie w wieku t dni [MPa]

f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie w wieku 28 dni [MPa]

$\beta_{cc}(t)$ – współczynnik zależny od wieku betonu t
 t – wiek betonu [dni]

s – współczynnik zależny od rodzaju cementu:

$s = 0,20$ dla cementów klasy 42,5R, 52,5N, 52,5R

$s = 0,25$ dla cementów klasy 32,5R, 42,5N

$s = 0,38$ dla cementów klasy 32,5N

Po połączeniu wzorów (4) i (5) oraz po uwzględnieniu odmiennych temperatur dojrzewania przez wyliczenie równoważnego wieku betonu t_e według wzoru (2), powstaje zmodyfikowany wzór do szacowania aktualnej wytrzymałości betonu [np. 8]:

Rys. 3. Automatyczny pomiar temperatury dojrzewającego betonu



fol. Archiwum autora

$$f_{cm}(t) = \exp s \left[I \left(-\sqrt{\frac{672-t_s}{t_e-t_s}} \right) \right] \cdot f_{cm} \quad (6)$$

gdzie:

$f_{cm}(t), f_{cm}, s$ – jak we wzorze (5)

t – wiek betonu [h]

t_e – równoważny wiek betonu [h]

t_s – czas wiązania betonu [h]

Eurokod 2 [7] w załączniku B proponuje sposób uwzględnienia wpływu temperatury z zakresu od 0 do 80°C na dojrzałość betonu poprzez wyliczenie równoważnego wieku betonu według następującego wzoru:

$$t_e = \sum_{i=1}^n \exp \left[-\left(\frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} - 13,65 \right) \right] \cdot \Delta t_i \quad (7)$$

gdzie:

t_e – równoważny wiek betonu w temperaturze odniesienia (+20°C) [h- lub dni]

$T(\Delta t_i)$ – średnia temperatura betonu w przedziale czasu Δt_i [°C]

Δt_i – przedział czasowy pomiaru temperatury [h lub dni]

Prowadząc wyliczenia równoważnego wieku betonu według wzoru (7), należy mieć świadomość, że jest on szczególnym przypadkiem ogólnego wzoru (2), a bez laboratoryjnie wyznaczonej energii aktywacji dla konkretnego betonu można otrzymać błędne wyniki szacowania aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji.

4. Praktyczne wykorzystanie funkcji dojrzałości w szacowaniu aktualnej wytrzymałości dojrzewającego betonu – ograniczenia stosowania metody

Praktyczne zastosowanie metody dojrzałości do określania aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji może mieć miejsce wszędzie tam, gdzie ta informacja jest niezbędna z uwagi na bezpieczeństwo i jakość realizacji kolejnych etapów budowy, a także w okresach obniżonych temperatur, kiedy konieczna jest świadomość opóźnionych przyrostów wytrzymałości. Tak więc znajduje zastosowanie w celu dopuszczenia do rozdeskowywania elementów bądź likwidacji podpór deskowania, w celu rozpoczęcia procesu naciągu kabli sprężających, w celu podjęcia decyzji dotyczącej zakończenia ochrony w warunkach zimowych oraz w celu obciążenia konstrukcji czy oddania jej do użytkowania. Zważając na zadania, które trzeba zrealizować przed rozpoczęciem takiego monitorowania i w trakcie wykonywania ciągłej rejestracji temperatur wraz z późniejszymi wyliczeniami, trudno jest sobie wyobrazić, że można je zrealizować bez specjalnego wsparcia aparaturowego. Dlatego najczęściej gdy stosowana jest metoda dojrzałości betonu do szacowania aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji, używa się urządzeń, które oprócz ciągłej rejestracji temperatury wewnątrz dojrzewającego elementu przetwarzają dane na podstawie ustalonych fabrycznie algorytmów, dając w efekcie co najmniej wartość wyliczonego wskaźnika dojrzałości betonu, lub ostateczną oczekiwaną informację o aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji [8, 9]. Wiarygodność wyników takich analiz uzależniona jest od zastosowanego modelu funkcji dojrzałości oraz od zastosowanego modelu zależności wytrzymałość-dojrzałość. Trzeba mieć absolutną świadomość, że dla obu tych modeli konieczne są dane z wcześniejszych badań wykonanych dla konkretnego betonu (receptury o określonym składzie jakościowym i ilościowym).

Jeśli system takich informacji nie wymaga, oznacza to, że zastosowane algorytmy używają wartości wejściowych ustalonych na podstawie uogólnionych analiz doświadczalnych i literaturowych. Należy się wtedy spodziewać, lub podejrzewać, że uzyskane podczas monitorowania wyniki szacowania aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji mogą być obarczone grubym błędem.

Jako główne ograniczenia stosowania metody dojrzałości norma ASTM [5] podaje trzy zasadnicze uwarunkowania:

- beton musi dojrzewać w warunkach zapewniających hydratację cementu,
- metoda nie uwzględnia efektów wczesnych temperatur młodego betonu na ostateczną jego wytrzymałość,
- metoda musi być wspomagana innym sposobem oznaczenia potencjalnej wytrzymałości danego betonu.

Odnosnie ostatniej uwagi – ta weryfikacja wynika z faktu, że metoda nie bada wytrzymałości, a jedynie daje informację o względnych przyrostach wytrzymałości. W przypadku podejmowania decyzji dla istotnych operacji związanych z bezpieczeństwem – np. rozdeskowanie, demontaż podpór, naciąg zbrojenia sprężającego – nie ma miejsca na dodatkowe ryzyko szacowania rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych materiału konstrukcyjnego.

Weryfikacja metody może polegać na innym sposobie pomiaru wytrzymałości wbudowanego betonu, badaniu wytrzymałości wczesnych próbek pobranych z betonu wbudowywanego i dojrzewających w warunkach normowych, lub badaniu wytrzymałości próbek pobranych z betonu wbudowywanego i poddanych przyspieszonemu dojrzewaniu [4].

dr inż. Grzegorz Bajorek
Politechnika Rzeszowska
Centrum Technologiczne Budownictwa
przy Politechnice Rzeszowskiej

Literatura

- 1 Bajorek G., *Pielęgnacja wciąż najłabszym ogniwem w technologii robót betonowych*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”, 1/2015
- 2 PN-EN 13670:2011 *Wykonywanie konstrukcji betonowych*
- 3 PN-EN 206:2014 *Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*
- 4 Carino N.J., Lew H.S., *The Maturity Method: from Theory to Application*, Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23, Washington 2001
- 5 ASTM C 1074-98 *Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*
- 6 PN-EN 12390-2:2011 *Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych*
- 7 PN-EN 1992 – Eurokod 2 *Projektowanie konstrukcji z betonu*
- 8 Jonasson J.E., Retelius A., *Zastosowanie metody wskaźnika dojrzałości do oceny rozwoju wytrzymałości betonu na ściskanie*, „Drogi i Mosty” 3/2011
- 9 Gajewski R., Szabat Ł., *System symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”, 3/2005, s. 42-45