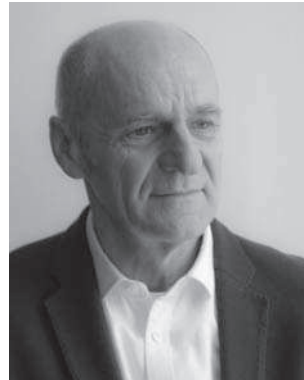


Właściwości betonu dojrzewającego w nienormowych warunkach kształtowanych przez górotwór

Properties of concrete maturing in non-standard conditions shaped by rock mass



*Mgr inż. Dariusz Hajto**



*Dr hab. inż. Andrzej Więckowski**

Treść: W artykule przedstawiono właściwości fizyczne mieszanki betonowej oraz zalecenia dotyczące pielęgnacji betonu w świetle wymagań normowych oraz Instrukcji ITB. Opisano wpływ temperatury otoczenia na dojrzewanie betonu w odniesieniu do wyników badań doświadczalnych. Przeanalizowano proces hydratacji cementu oraz wydzielania ciepła w funkcji czasu, przez dojrzewający beton w zależności od temperatury.

Abstract: This paper presents the physical properties of a concrete mix and recommendations for concrete maintenance in the light of standard requirements and the Manual of Building Technique Institute (ITB). The influence of ambient temperature on maturing concrete was described in relation to the results of the scientific research. The hydration process of cement and heat emission was analyzed in relation to time, by the maturing concrete depending on the temperature.

Key words:

hydratacja cementu, pielęgnacja betonu, ciepło hydratacji

Słowa kluczowe:

cement hydration, concrete maintenance, hydration heat

1. Wprowadzenie

Zgodnie z prenormą ENV 13670-1:2000, [2], betonowanie i pielęgnacja młodego betonu są zalecane w temperaturach z przedziału od +5 °C do +25 °C. W realizacjach związanych z górnictwem nierzadko występuje potrzeba wykonawstwa betonowych konstrukcji monolitycznych, zarówno przy znacząco niższych, jak i dużo wyższych temperaturach otoczenia, niż wskazane w powyższej prenormie.

Wyższe temperatury w środowisku betonowania, niż przewidziane w prenormie [2] występują w górotworze, na większych głębokościach pod powierzchnią Ziemi. Wyczerpywanie się płytko zalegających złóż zmusza górnictwo do schodzenia na coraz niższe poziomy. Wiąże się to z koniecznością wykonawstwa robót przy wysokich temperaturach górotworu. Temperatury notowane w polskich kopalniach, zgodnie z [14] wynoszą, np. +48 °C w LGOM (Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy, Grębocice k. Polkowic, głębokość 1200 m).

Do stabilizacji ośrodka o niekorzystnych parametrach, szczególnie przy znacznych dopływach wód, zarówno w ska-

łach luźnych, jak i szczelinowatych, w licznych przypadkach niezastąpioną metodą okazuje się zamrożenie górotworu. Metoda ta determinuje temperaturę, która zgodnie z [9], w pobliżu instalacji mrożącej może wynosić nawet poniżej -45 °C, a na ociosie wyrobiska na ogół występują temperatury około od -10 °C do -15 °C.

Poniżej przeanalizowano proces wiązania cementu, warunki betonowania, pielęgnacji i twardnienia betonu w środowisku normowym oraz przy podwyższonych i obniżonych temperaturach otoczenia.

(Kontynuacją tematu będzie następny artykuł, pt. „Warunki betonowania wyznaczone podwyższonymi i obniżonymi temperaturami górotworu”)

2. Właściwości fizyczne mieszanki betonowej i betonowanie według PN-EN 206-1/2003 i ENV 13670-1:2000

Po zarobieniu cementu wodą w okresie I, tzw. wstępnego dojrzewania – zaczyn cementowy początkowo jest podobny do zawiesiny cząstek stałych w cieczy, [6, 15]. Z upływem czasu, w wyniku reakcji chemicznych, na powierzchniach ziaren cementu wytwarzają się drobne kryształy w for-

*) AGH w Krakowie

mie szczecinek, a woda nasycy się produktami hydratacji. W konsekwencji cechy fizyczne mieszanki zmieniają się. Pod koniec okresu I, mieszanka zyskuje postać lepkiej masy, o podwyższonej zwięzłości, która przy badaniu stawia wyraźny opór wciskanemu prętowi. Mieszanka zachowuje jednak właściwości podobne do płynów z zawiesziną.

Zgodnie z PN-EN 196-3:2006P, [12], za początek czasu wiązania, następujący po zakończeniu okresu I - wstępnego dojrzewania przyjmuje się okres czasu, od chwili, pierwszego kontaktu cementu z wodą do chwili kiedy igła w aparacie Vicata opada na odległość (6 ± 3 mm) od płytki bazowej.

W okresie II – wiązania, woda osiąga nasycenie wapnem i na ziarnach minerałów cementu zaczynają się tworzyć pierwsze większe narosty krystaliczne. Następuje wtedy dalszy, przyspieszony postęp hydratacji i intensywny przyrost kryształów na ziarnach cementu. Procesom tym towarzyszy gęstnienie mieszanki, wzrost lepkości i zwartości. Mieszanka uzyskuje większą wytrzymałość plastyczną, która stawia coraz większy opór wciskanej w nią igle.

Do oznaczania czasu wiązania betonu zgodnie z PN-EN 196-3:2006P stosuje się zaczyn cementowy o normowej konsystencji. Za czas wiązania przyjmuje się okres od pierwszego kontaktu cementu z wodą do chwili, gdy druga nasadka, na igle o przekroju 1 mm^2 (średnicy $1,13 \text{ mm}$) zagłębia się już tylko na głębokość $0,5 \text{ mm}$ w zaczynie znajdującym się w pierścieniu ustawionym na podstawie przyrządu Vicata.

W następnym, okresie III - twardnienia, trwającym do 28 dnia włącznie, ma miejsce tężenie masy i nabieranie mechanicznej wytrzymałości przez młody beton. W okresie IV - eksploatacji, po upływie 28 dni od chwili zarobienia cementu wodą występuje już beton dojrzały.

Zgodnie z PN-EN 206-1:2003, [13, punkt 5.2.8], mieszanka betonowa w chwili wbudowania powinna mieć temperaturę nie niższą niż 5°C . Według prenormy ENV 13670-1:2000 [2, tabela 1e], minimalny okres pielęgnacji betonu jest uzależniony od: τ_w - okresów wiązania, r - szybkości rozwoju wytrzymałości betonu, t - temperatury na powierzchni betonu oraz klasy ekspozycji betonu.

Szybkość rozwoju wytrzymałości betonu r , zgodnie z ENV 13670-1:2000 określa się z relacji

$$r = f_{cm2} / f_{cm28}$$

gdzie:

f_{cm2} i f_{cm28} – średnie wytrzymałości na ściskanie, odpowiednio po 2 i po 28 dniach, wyznaczone na podstawie badań wstępnych lub opartych o wartości charakteryzujące betony o porównywalnym składzie, PN-EN 206-1:2003.

Zgodnie z tablicą 1, minimalny okres pielęgnacji betonu w temperaturze otoczenia powyżej 25°C wynosi: od 1 dnia - dla mieszanek o szybkim wzroście wytrzymałości ($r \geq 0,5$) do 3 dni - dla mieszanek o powolnym wzroście wytrzymałości ($r < 0,15$). Dla temperatur otoczenia większych bądź równych 5°C lecz mniejszych niż 10°C , minimalne okresy pielęgnacji wynoszą odpowiednio, od 3 do 15 dni, w zależności od tempa rozwoju wytrzymałości r . Okres pielęgnacji powinien zostać dodatkowo wydłużony o liczbę dni, kiedy temperatura otoczenia spada poniżej 5°C .

Planując prace betoniarskie w okresie, gdy temperatura otoczenia jest poniżej 5°C lub powyżej 25°C , należy przewidzieć środki zabezpieczające młody beton przed uszkodzeniami wynikającymi z negatywnego wpływu takiej temperatury.

Zgodnie z ENV-13670-1:2000, [2, punkt 8.5] „Temperatura powierzchni betonu nie powinna spadać poniżej 0°C , dopóki powierzchnia betonu nie osiągnie wytrzymałości, przy której jest odporna na zamarzanie bez uszkodzeń (zazwyczaj, gdy $f_c > 5 \text{ MPa}$)” oraz [2, punkt E8.3] „Zaleca się aby temperatura

Tablica 1. Minimalny okres pielęgnacji betonu, według ENV 13670-1:2000

Table 1. Minimum period of concrete maintenance according to ENV 13670-1:2000

Temperatura powierzchni betonu (t) $^\circ\text{C}$	Minimalny okres pielęgnacyjny, (w dniach) ^{1),2)}			
	Rozwój wytrzymałości betonu ⁴⁾ (f_{cm2}/f_{cm28}) = r			
	Szybki $r \geq 0,50$	Średni $r = 0,30$	Powolny $r = 0,15$	Bardzo powolny $r < 0,15$
$t \geq 25$	1	1,5	2	3
$25 > t \geq 15$	1	2	3	5
$15 > t \geq 10$	2	4	7	10
$10 > t \geq 5^3)$	3	6	10	15

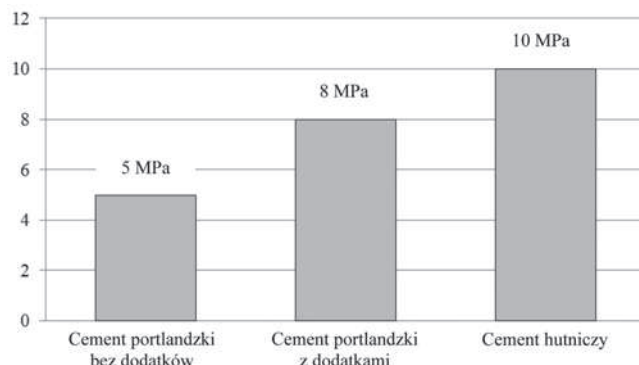
UWAGA

1. Plus każdy okres wiązania przekraczający 5 godzin
2. Dopuszczalna jest interpolacja liniowa pomiędzy wartościami w wierszach
3. Dla temperatur poniżej 5°C czas trwania pielęgnacji powinien być zwiększony o okres kiedy temperatura jest poniżej 5°C .
4. Rozwój wytrzymałości betonu jest mierzony stosunkiem średniej wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach, f_{cm2} , do średniej wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, f_{cm28} , wyznaczonych na podstawie badań wstępnych lub opartych na wartościach charakteryzujących, betonu o porównywalnym składzie (patrz EN 206-1:2000)

powierzchni złącz technologicznych betonowanej konstrukcji w czasie betonowania była wyższa niż 0°C ”.

W instrukcji ITB-282 z 1995 r., [5], scharakteryzowano zagadnienie dokładniej. Wskazano, że odporność betonu na działanie czynników atmosferycznych uzyskuje się dopiero przy wytrzymałościach na ściskanie, które wynoszą co najmniej: 5 MPa – w przypadku użycia cementu portlandzkiego bez dodatków, 8 MPa - przy zastosowaniu cementu portlandzkiego z dodatkami i dopiero przy około 10 MPa , przy betonach wykonanych z cementu hutniczego, rys. 1.

Zatem, zgodnie z Instrukcją ITB-282 uzyskanie przez beton granicy wytrzymałości równej 5 MPa nie gwarantuje, iż niska temperatura nie wpłynie negatywnie na dalszy przebieg procesu hydratacji. Równocześnie, wg tej Instrukcji [7]: „jeśli przed osiągnięciem wytrzymałości betonu na zamarzanie jego temperatura spadnie do -1°C , nastąpi zniszczenie struktury młodego betonu przez zamarzanie”.



Rys. 1. Niezbędne wytrzymałości betonu na ściskanie, przy których niska temperatura nie wpływa negatywnie na dalszy przebieg procesu hydratacji, według Instrukcji ITB-282, [7]

Fig. 1. Necessary compression strength of concrete, where low temperature does not have an adverse effect on the further course of hydration process according to ITB-282 Manual, [7]

Wyniki badań doświadczalnych Henga, [4], wykazują, że beton dojrzewający w warunkach obniżonych temperatur charakteryzuje się znacznie mniejszą wytrzymałością niż próbki referencyjne dojrzewające w warunkach normowych określonych przez PN-EN 12390-2.

Liczne badania porównawcze dla betonów dojrzewających w różnych temperaturach, wykonane przez Henga zostały przedstawione w pracy [4]. Wszystkie badane próbki betonu, przez pierwsze dwie doby dojrzewały w temperaturze 5°C. W trzeciej dobie próbki podzielono na dwie grupy. Probki z I grupy umieszczono w temperaturze -8 °C, a próbki z II grupy w temperaturze -2°C. Po 28 dniach próbki z obu grup umieszczono w temperaturze 20°C.

W przypadku próbek I, rys. 2, umieszczonych w temperaturze -8°C, od 6 doby stwierdzono znaczne spowolnienie przyrostu wytrzymałości, a po 21 dniach przyrost wytrzymałości praktycznie został zatrzymany i wytrzymałość próbki stanowiła zaledwie około 30% wytrzymałości próbki referencyjnej. Po zwiększeniu temperatury do 20°C, w 28 dniu, nastąpił szybki wzrost wytrzymałości. Wytrzymałość betonu 4-miesięcznych próbek I grupy, umieszczonych w temperaturze -8°C, była o około 15% niższa, niż próbek referencyjnych umieszczonych w warunkach normowych.

W przypadku II grupy próbek, rys. 3, największe spowolnienie procesu narastania wytrzymałości, względem próbki referencyjnej, miało miejsce w pierwszych dwóch dobach, kiedy próbka znajdowała się w temperaturze 5°C. Następnie po umieszczeniu próbki w temperaturze -2°C, wytrzymałość

próbek narastała w podobnym tempie, jak próbek referencyjnych, osiągając około 75% wytrzymałości próbki referencyjnej. Nie zaobserwowano znaczącego wzrostu tempa przyrostu wytrzymałości po umieszczeniu próbek II, w temperaturze 20°C. Wytrzymałość 4-miesięczna próbek II grupy, również była o około 10% niższa, niż próbek referencyjnych.

3. Ciepło hydratacji cementu

Procesy chemiczne zachodzące podczas wiązania i twardnienia cementu mają charakter egzotermiczny [1]. Emisja ciepła jest wynikiem hydratacji poszczególnych mineralnych składników cementu. W tabelicy 2, przykładowo ujęto wielkości energii wydzielającej się podczas hydratacji cementu portlandzkiego oraz wybranych jego składników.

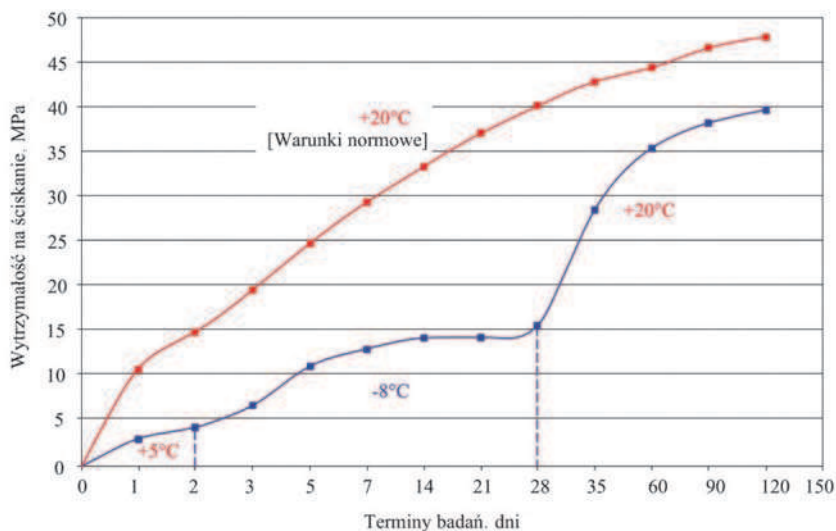
Tablica 2. Energia hydratacji cementu i niektórych jego składników, wg [1]

Table 2. Hydration power of cement and some of its components according to [1]

Substancja	Energia hydratacji J/g
Cement portlandzki	450÷600
Alit	570
Belit	260
Faza glinianowa	900
Faza ferrytowa	430

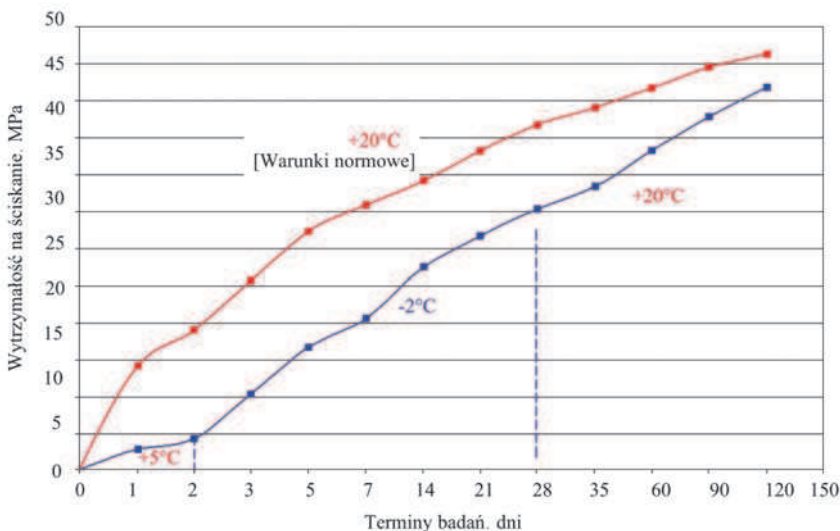
Rys. 2. Przyrosty wytrzymałości betonu schłodzonego do temperatury -8 °C oraz próbek betonu przechowywanych w warunkach normowych, opis w tekście, według [4]

Fig. 2. Increments of strengths of concrete cooled to -8 °C and concrete samples stored in standard conditions, description in the paper, according to [4]



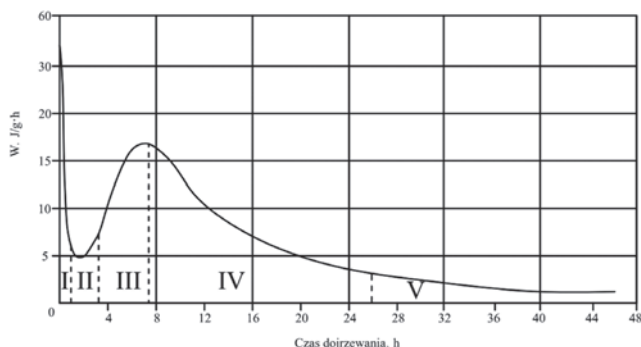
Rys. 3. Przyrosty wytrzymałości betonu schłodzonego do temperatury -2 °C oraz próbek betonu przechowywanych w warunkach normowych, opis w tekście, według [4]

Fig. 3. Increments of strengths of concrete cooled to -2 °C and concrete samples stored in standard conditions, description in the paper, according to [4]



Największa energia hydratacji jest zgromadzona w fazie glinianowej, natomiast najmniejsza w belicie.

Obok składu mineralnego cementu, zgodnie z Kurdowskim, [8], na intensywność procesu wydzielania się ciepła hydratacji mają wpływ: temperatura zaczynu, rozdrobnienie spoiwa, wartość współczynnika wodno-cementowego oraz zawartości domieszek. Całkowity efekt termiczny reakcji jest określany mianem ciepła twardnienia. Zgodnie z Witakowskim [17], do opisu niestacjonarnego pola temperatury twardniejącego betonu wymagana jest znajomość, tzw. funkcji źródeł - W , która wynika z mocy ciepła twardnienia. Przebieg modelowej funkcji źródeł W ujmuje rys. 4.



Rys. 4. Typowy przebieg funkcji źródeł twardniejącego cementu - W , według [7]

Fig. 4. Standard course of the function of sources of the hardening cement - W , according to [7]

Intensywność wydzielania ciepła hydratacji, zgodnie z rys. 4, można umownie podzielić na pięć okresów. Największą zmianę intensywności wydzielania ciepła, wraz upływem czasu dojrzewania młodego betonu obserwuje się w I okresie, w którym po początkowej bardzo dużej intensywności wydzielania ciepła, ma miejsce gwałtowny jej spadek. W II okresie przebieg funkcji źródeł początkowo nieznacznie zmniejsza się, następnie podobnie łagodnie wzrasta. W III okresie ponownie ma miejsce duży wzrost intensywności wydzielania ciepła, jednak mniejszy, niż w okresie I. Następnie w IV okresie występuje spadek intensywności emisji energii, malejącej asymptotycznie do zera w okresie V.

Przebieg funkcji źródeł W jest silnie uzależniony od temperatury dojrzewania młodego betonu, rys. 5. Przy różnych temperaturach dojrzewania, od 5 °C, zwiększanych co 5 °C, aż do 50 °C, największa dynamika emisji ciepła występuje w I okresie. Maksymalne wartości funkcji źródeł W wynoszą od około 25 J/(g×h) do około 70 J/(g×h) dla temperatur odpowiednio, najniższej 5 °C i najwyższej 50 °C. W II okresie przebieg funkcji źródeł tylko nieznacznie zmienia się w zależności od temperatury. W III okresie, przy niskich temperaturach, do 10°C zauważa się nieznaczny wzrost dynamiki wydzielania ciepła, natomiast przy temperaturach wyższych intensywność wydzielania ciepła rośnie do wartości funkcji źródeł $W(t) \cong 35$ J/(g×h), przy temperaturze najwyższej, +50°C. W III okresie, przy wyższych temperaturach, lokalne maksimum dynamiki wydzielania ciepła ulega przesunięciu, z około 15 godziny - na 5 godzinę (w odniesieniu do chwili zmieszania cementu z wodą). Okres IV i V to przedział czasu, w którym maleje emisja energii, aż do całkowitego zaniku wydzielania ciepła po około 100 godzinach od chwili zarobienia cementu wodą.

Podsumowując, zauważa się, że zmiany temperatury, w których przebiega proces hydratacji cementu powodują odpowiednie zmiany intensywności wydzielania ciepła. Wraz ze wzrostem temperatury, w przyspieszonym tempie wzrasta emisja ciepła i jednocześnie skracają się czasy trwania charakterystycznych okresów dojrzewania betonu. Natomiast wraz ze spadkiem temperatury ma miejsce proces odwrotny. Proces hydratacji znacznie się wydłuża w czasie, a ciepło wydzielane się wolniej. Stąd wywołane zmianami temperatury, zmiany dynamiki wydzielania ciepła wiążą się ściśle ze spowolnieniem lub przyspieszeniem procesu wiązania i twardnienia mieszanki betonowej.

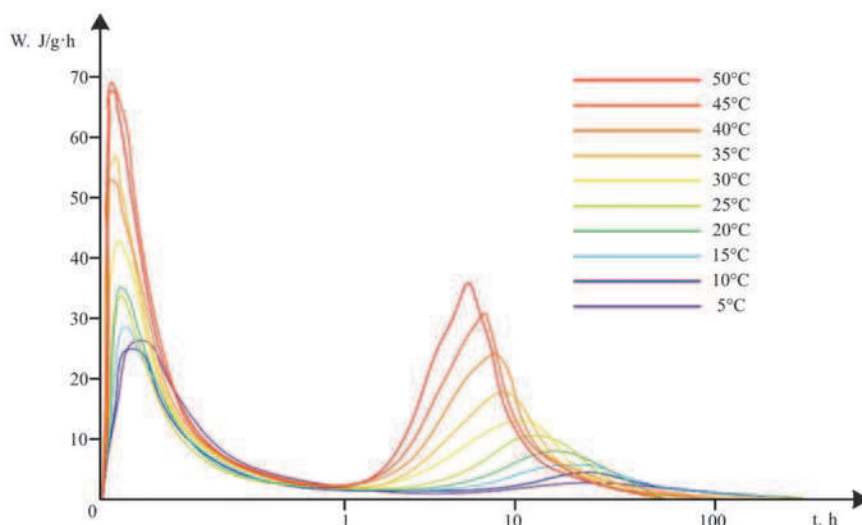
Flaga, [2], funkcję źródeł W , opisuje zależnością odpowiednio dostosowaną do wyników doświadczalnych. Wpływ temperatury na przebieg funkcji źródeł uwzględnia poprzez zastosowanie, tzw. funkcji temperatury, która jest następująca

$$f_{(T)} = 2^{\frac{9,8 \cdot (T_i - 20)}{T_i + 78}}$$

gdzie:

T_i – temperatura twardnienia cementu.

Po uwzględnieniu temperatury twardnienia funkcja źródeł przyjmie postać



Rys. 5. Zależność funkcji źródeł od temperatury, według [17]

Fig. 5. Relation between the source function and the temperature, according to [17]

$$W = \frac{a_1 \cdot C \cdot q \cdot f(T)}{2 \int_0^t (f(T)) dt}^{1,5} \cdot e^{-\frac{a_1}{\sqrt{\int_0^t (f(T)) dt}}}$$

gdzie:

- a_1 – współczynnik wyznaczony eksperymentalnie,
- C – zawartość cementu w 1 m³ mieszanki betonowej,
- q – całkowite ciepło twardnienia jednostki masy cementu.

Całkując funkcję źródeł W względem czasu dojrzewania t , w granicach, od $t = 0$ odpowiadającej chwili zarobienia cementu wodą do nieskończoności, otrzymuje się całkowitą ilość ciepła, którą wydziela hydratyzujący cement.

Wydzielające się ciepło hydratacji podnosi temperaturę betonu tym bardziej, im bardziej utrudnione jest odprowadzanie ciepła na zewnątrz. Zakładając adiabatyczny (graniczny) przypadek dojrzewania, czyli dojrzewanie w warunkach braku wymiany ciepła z otoczeniem, zgodnie z [17, 10], hydratacja cementu o kaloryczności 420 J/g spowodowałaby następujące wzrosty temperatury:

- o 227 °C, w normowym zaczynie cementowym stosowanym w próbie Vicata, (125 g wody, 500 g cementu, wg [10],
- o 83 °C, w zaprawie normowej (cement : woda : piasek = 1 : 0,5 : 3, wg [10]),
- o 65 °C, w betonie o zawartości cementu 300 kg/m³.

Zgodnie z prenormą ENV 13670-1:2000, [2, punkt 8.5] „Najwyższa temperatura wewnątrz konstrukcji betonowej nie powinna przekraczać 65°C, z zastrzeżeniem sytuacji, kiedy na podstawie oddzielnych analiz wykazano, iż wyższa temperatura nie będzie miała szkodliwego wpływu na zachowanie się betonu”.

W warunkach wykonawstwa wraz z powiększaniem wymiarów betonowego elementu zwiększa się ilość zastosowanego cementu, tym samym zwiększa się ilość zgromadzonej w nim energii cieplnej uwalnianej w procesie hydratacji. Stąd szczególnie przy dużych elementach masywnych (to jest, o względnie małej powierzchni zewnętrznej elementu względem jego objętości) znaczny wzrost temperatury młodego betonu, może powodować uszkodzenie konstrukcji. Wówczas odprowadzenie ciepła hydratacji, zgodnie z [16], jako odrębny problem techniczny, powinno być rozwiązywane indywidualnie.

4. Podsumowanie

Zgodnie z prenormą ENV-13670-1:2000, [1]:

- okres pielęgnacji betonu zależy od szybkości rozwoju wytrzymałości betonu - r oraz od temperatury na jego powierzchni - t ; dla wartości $r \geq 0,50$ i $t \geq 25$ °C do wartości $r < 0,15$ i $t \geq 5$ °C okres pielęgnacji betonu wynosi, odpowiednio od 1 do 15 dni, plus ilość dni z temperaturą otoczenia poniżej 5 °C,
- zalecana temperatura powierzchni złącz technologicznych betonowanej konstrukcji powinna być wyższa niż 0 °C, a temperatura powierzchni betonu nie powinna spadać poniżej 0 °C, dopóki ta powierzchnia nie osiągnie wytrzymałości, przy której jest odporna na zamarzanie bez uszkodzeń „zazwyczaj, gdy $f_{ck} > 5$ MPa”, z niższym doprecyzowaniem.

Według Instrukcji ITB-282, [7]:

- odporność betonu na działanie czynników atmosferycznych uzyskuje się dopiero przy wytrzymałościach na ściskanie, zależnych od zastosowanego cementu, które wynoszą: 5 MPa – dla cementu portlandzkiego bez dodatków, 8 MPa – dla cementu portlandzkiego z dodatkami i około

10 MPa dla cementu hutniczego; natomiast, jeśli przed osiągnięciem takich wytrzymałości temperatura betonu spadnie do -1 °C, nastąpi zniszczenie struktury młodego betonu przez zamarzanie.

Na podstawie badań Henga, [8]:

- dojrzewania próbek betonu I i II grupy, przez pierwsze dwie doby w temperaturze 5 °C, następnie w temperaturach, I grupa -8 °C, II grupa -2 °C oraz po 28 dniach dalsze dojrzewanie w temperaturze 20 °C (I i II grupa próbek) wytrzymałość betonu 4-miesięcznych próbek I grupy, była o około 15% niższa, a próbek II grupy o około 10% niższa, niż próbek referencyjnych umieszczonych w warunkach normowych.

Należy podkreślić, że przed osiągnięciem przez beton wytrzymałości na ściskanie z przedziału od 5 MPa do 10 MPa (zależnie od zastosowanego cementu) obniżenie temperatury dojrzewania, już do -1 °C powoduje zniszczenie struktury młodego betonu przez zamarzanie oraz znaczący spadek jego wytrzymałości względem betonu dojrzewającego w warunkach normowych.

Procesy chemiczne zachodzące podczas wiązania i twardnienia cementu mają charakter egzotermiczny, z największą energią hydratacji zgromadzoną w fazie gilotanowej, a najmniejszą w belicie. Intensywność wydzielania się ciepła hydratacji wynika, z tzw. mocy ciepła twardnienia, opisanej funkcją źródeł – W . Zgodnie z Flagą [14] na funkcję W istotnie wpływa temperatura twardnienia betonu, uzależnia od, tzw. funkcji temperatury - $f_{(T)}$. W przypadku granicznego założenia adiabatycznych warunków dojrzewania (przy niewystępowaniu wymiany ciepła z otoczeniem) hydratacja cementu o kaloryczności, np. 420 J/g powoduje wzrost temperatury o 65 °C, w betonie o zawartości cementu 300 kg/m³. Obecnie wykonywane konstrukcje zazwyczaj charakteryzują się znacznie większym udziałem cementu w mieszankach betonowych. Stąd przyrost temperatury w dojrzewającym młodym betonie jest jeszcze większy. Problemem są szczególnie elementy masywne, gdzie występuje konieczność odprowadzenia proporcjonalnie dużych ilości ciepła hydratacji (względem zawartości cementu), aby zgodnie z prenormą ENV 13670-1:2000, dojrzewający młody beton, nie przekroczył temperatury 65 °C.

Stąd wbudowanie i pielęgnacja młodego betonu w warunkach górotworu, przy naturalnie wysokich temperaturach w polskich kopalniach, nawet do 50 °C, jak też temperatur znacznie niższych od normowych 5 °C, występujących przy zamrażaniu górotworu (poniżej - 10 °C) wymagają uwzględnienia opisanych cech dojrzewającego betonu.

Literatura

1. Czarnecki L., Broniewski T. i Heinning O.: Chemia w budownictwie. Arkady, Warszawa 2010.
2. ENV 13670-1:2000 Wykonywanie konstrukcji betonowych. Cz.1: Uwagi ogólne.
3. Flaga K.: Energetyczne podstawy wzrostu wytrzymałości betonu tężącego w warunkach obróbki termicznej. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, 1971, nr 3.
4. Heng S. S.: Wpływ obniżonej temperatury na rozwój wytrzymałości betonu. Dni betonu, Wisła 2010.
5. Instrukcja ITB-282 (1995): Wytyczne wykonywania robót budowlano-montażowych w okresie obniżonych temperatur. ITB, Warszawa.
6. Jamróży Z.: Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
7. Kiernożycki W.: Betonowe konstrukcje masywne. Polski Cement, Kraków 2003.

8. *Kurdowski W.*: Chemia cementu i betonu. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010
 9. *Pleśniak I., Przygodzka B.*: Mrożenie gruntów przy budowie obiektów przemysłowych i górniczych. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej, nr 56, Seria: Konferencje, nr 27, Wrocław 1988
 10. PN-88/B-04300 Cement. Metody badań.
 11. PN-EN 12390-2:2009 Badania betonu - Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
 12. PN-EN 196-3:2006P Metody badania cementu – Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości.
 13. PN-EN 206-1:2003 Beton - Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność .
 14. *Szlązak N. z zespołem*: Ocena stanu zagrożenia metanowego i temperaturowego w rejonie ścian eksploatacyjnych, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2008.
 15. *Więckowski A.*: Transport mieszanki betonowej. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2014.
 16. *Witakowski P.*: Technologia budowy konstrukcji masywnych z betonu. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych” XIII Konferencja Naukowa, Korbielów 2001.
 17. *Witakowski P.*: Termodynamiczna teoria dojrzewania, zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1998.
-
-