

Paweł KRAUSE\*  
Politechnika Śląska

## CHARAKTERYSTYKI TERMICZNE TWARDNIEJĄCEGO BETONU

**Streszczenie.** W celu opisanie zjawisk termicznych układu twardniejący beton-osłona termoizolacyjna-środowisko zewnętrzne w niskich temperaturach otoczenia przedstawiono wybrane charakterystyki termiczne dojrzewającego betonu oraz zaproponowano sposób wyznaczania rozkładów pól temperatur w betonie.

## THERMAL CHARACTERISTICS OF HARDENING CONCRETE

**Summary.** The main subject of the paper is description of heat-processes, taking place between hardening concret and external environment with low temperatures, through a thermal insulation. To do this, thermal characteristics of hardening concrete are presented together with fields of temperatures distribution in concrete.

### 1. Wprowadzenie

Przebieg zjawisk termicznych zachodzących w dojrzewającym betonie, ze względu na złożony wpływ szeregu wewnętrznych i zewnętrznych czynników, pozostaje nie do końca wyjaśnionym problemem. Twardnienie betonu jest procesem skoniugowanych oraz sprzężonych ze sobą zjawisk, zachodzących pomiędzy aktywnymi cząstkami cementu i pozostałymi składnikami mieszanki betonowej. Ich złożoność łączy się również z określeniem zjawisk fizycznych związanych z wydzielaniem się ciepła twardnienia. Ze względu na upraszczające założenia, iż poszczególne procesy fizykochemiczne zachodzące w twardniejącym betonie przebiegają niezależnie i nie oddziałują na siebie, opis zjawisk cieplnych jest pewnego rodzaju przybliżeniem [1,9,14,15]. Wymiana ciepła pomiędzy dojrzewającym betonem a otoczeniem, spowodowana zmienną aktywnością wewnętrznego źródła ciepła, wpływa w sposób zasadniczy na kształtowanie się jego

\* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Janusz Szwabowski.

właściwości. Odzwierciedleniem tego zjawiska jest występowanie niestacjonarnych pól temperatur w masie badanego tworzywa. W celu określenia rozkładu temperatur w betonie niezbędna jest znajomość jego właściwości fizycznych oraz parametrów opisujących ilość wydzielanego ciepła w procesie twardnienia. Do analizy zjawisk ruchu ciepła przyjęto układ wielowarstwowy, stanowiący część środowiska zewnętrznego wyodrębnionego za pomocą osłony termoizolacyjnej, wewnątrz której znajduje się dojrzewający beton. Zastosowanie termoizolacji umożliwi w wymaganym czasie zapewnienie warunków dojrzewania betonu, zbliżonych do warunków normalnych. W obniżonych temperaturach otoczenia procesy fizykochemiczne, zachodzące w dojrzewającej masie betonowej, przebiegają wolniej lub mogą być całkowicie zahamowane. W zakresie zjawisk termochemicznych kinetyka przemian oraz ilość wydzielanego ciepła reakcji zależy od temperatury. Jej spadek o 10°C spowalnia dwukrotnie przebieg reakcji chemicznych [5,15]. Produkty hydratacji cementu powstałe w obniżonych temperaturach różnią się jakościowo od związków utworzonych w normalnych warunkach dojrzewania. W przypadku oddziaływania niskich temperatur istotnym zagadnieniem jest zapewnienie odpowiednich warunków przebiegu procesu wiązania tworzywa cementowego, pozwalając na uzyskanie odporności na destrukcyjne oddziaływanie otoczenia.

## 2. Właściwości termiczne betonu

Wyznaczenia rozkładów pól temperatur twardniejącego betonu można określić w oparciu o jego termofizyczne właściwości z równania różniczkowego Fouriera-Kirchhoffa [1,6,13].

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c_p \rho} \quad (1)$$

Obliczenie pól temperatur jest możliwe dla znanych warunków początkowych i brzegowych. Warunek początkowy równania ma postać (2):

$$T_0(x_i, 0) = T_b(x_i, 0) \quad (2)$$

Wymiana ciepła z otoczeniem może być opisana równaniem (3) [1,6,13]:

$$\alpha_p (T_i - T_e) + \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

Ruch ciepła z powierzchni betonu odbywa się zgodnie z prawem Newtona (4) [6].

$$q_b = \alpha_p (T_i - T_e) \quad (4)$$

W pracy [5] zaproponowano wprowadzenie zastępczego współczynnika przyjmowania ciepła na powierzchni betonu, uwzględniając grubość ( $d_i$ ) oraz współczynnik przewodzenia ciepła ( $\lambda$ ) osłony termoizolacyjnej (5).

$$\alpha_{pz} = \frac{\lambda_i \alpha_p}{\lambda_i + d_i \alpha_p} \quad (5)$$

Intensywność wymiany ciepła twardniejącego betonu z otoczeniem, zależąca od jego właściwości, uzewnętrznia się zmiennością ciepła właściwego oraz współczynnika przewodzenia ciepła. Wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła jako cechy dojrzewającego betonu jest złożonym zagadnieniem, związanym w określonym zakresie czasu ze zmianą stanu skupienia tworzywa. Ruch ciepła przez przewodzenie twardniejącego betonu można rozpatrywać w dwóch fazach. W pierwszej fazie wydzielania się ciepła twardnienia uzewnętrznia się zmienne pole temperatur, uzależnione od intensywności wewnętrznego źródła ciepła. W rozpatrywanym przypadku następuje wzrost temperatury związany z przebiegiem procesów termochemicznych, następnie proces stygnięcia aż do stabilizacji termicznej z temperaturą otoczenia. Przy braku odpowiednich warunków środowiskowych wzrost temperatury dojrzewającego betonu może w ogóle nie nastąpić, co potwierdziły badania własne. Z punktu widzenia termodynamiki dopiero po ustabilizowaniu się pól temperatury można wyznaczyć współczynnik przewodzenia ciepła. Dane literaturowe dotyczące powyższego zagadnienia wskazują na wyraźne rozbieżności, dotyczące przyjmowania cech materiałowych betonu, szczególnie w początkowym okresie twardnienia.

Należy przyjąć, że większość danych literaturowych dotyczy drugiej fazy ruchu ciepła, pomijając wpływ wewnętrznego źródła ciepła, stąd podawane wielkości współczynnika  $\lambda$  wahają się w granicach 1,0–3,6 W/mK [1-15]. Szeroki opis kształtowania się struktury betonu ze względu na przewodność cieplną można znaleźć w [7]. Czynnikiem decydującymi o kształtowaniu się przewodności cieplnej betonu wynikającej ze składu fizykochemicznego są: gęstość objętościowa, wielkość i struktura porów, wilgotność oraz temperatura. Przedstawione parametry wpływają w określonym stopniu na współczynnik przewodzenia ciepła stwardniałego betonu. Zależność przewodności cieplnej od zawartości składników betonu ( $G_i$ ) oraz parametrów materiałowych ( $f_{i1}$ ) przedstawiono w [4,8].

$$\lambda = \Sigma G_i f_{i1} \quad (6)$$

Cammerer [5] uzależnił przewodność cieplną betonu od zawartości ilości wody ( $w$ ), cementu ( $z$ ) oraz normowego współczynnika przewodzenia ciepła stwardniałego betonu ( $\lambda_r$ ), wprowadzając parametry materiałowe  $\theta = 0,05$  oraz  $\theta_r = (w-0,22z)/1000$ .

$$\lambda = \lambda_T(1+12\theta)/(1+12\theta_T), \quad (7)$$

W uwarunkowaniach technologicznych procesów realizacji elementów betonowych wpływ zmienności temperatury materiału na współczynnik przewodzenia ciepła, wskutek oddziaływania ciepła twardnienia, uzależniony jest od innych czynników, szczególnie od zmiany zawartości wilgoci, stąd w dalszych rozważaniach może być pominięty [3]. Wyznaczenie przewodności cieplnej składników stałych jest bardzo skomplikowane ze względu na zmienne właściwości termiczne tworzących się produktów hydratacji. Przewodzenie ciepła przez beton odbywa się przez składniki stałe (szkielet) oraz powietrze zawarte w porach materiału. Zmiana właściwości fizycznych matrycy cementowej i zawartość rozproszenia fazy ciekłej i gazowej w fazie stałej oraz zawartość powietrza w porach wpływają na kształtowanie się przewodności cieplnej betonu. Ruch ciepła w porach materiału może odbywać się poprzez przewodzenie, konwekcję swobodną, promieniowanie oraz wymianę ciepła przez dyfundującą wilgoć [1]. Propozycję opisu współczynnika przewodzenia ciepła, jako charakterystyki termicznej, w zależności od stopnia hydratacji cementu ( $\alpha$ ) oraz współczynnika przewodzenia ciepła suchego betonu ( $\lambda_b$ ) przedstawili w swej pracy Trinhztfy i Jongendijk [4,5]

$$\lambda(\alpha) = \lambda_b(2 - \alpha). \quad (8)$$

W pracy [1] uzależniono współczynnik przewodzenia ciepła betonu od wartości współczynnika przewodności cieplnej betonu po 28 dniach twardnienia ( $\lambda_b$ ) oraz wilgotności objętościowej betonu ( $w$ )

$$\lambda(w) = \lambda_b(1 - 17w^2 + 11w). \quad (9)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła betonu można wyznaczyć za pomocą zagadnień odwrotnych przepływu ciepła jako funkcję temperatury przedstawioną w postaci wielomianu [13]:

$$\lambda = a_1 + a_2T + a_3T^2 \quad (10)$$

Wielkości stałe  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  przyjmuje się na podstawie eksperymentu dla najprostszego kształtu próbki oraz określonych warunków cieplnych. Właściwości termiczne betonu, obok współczynnika przewodzenia ciepła, zależą od jego ciepła właściwego. Parametr ten wpływa na ilość zakumulowanej energii cieplnej w twardniejącym betonie, szczególnie istotnej w przypadku zintensyfikowanej wymiany ciepła pomiędzy betonem a środowiskiem zewnętrznym w warunkach niskich temperatur. Ciepło właściwe zależy głównie od zawartości wilgoci w materiale, temperatury oraz ciężaru objętościowego [11]. Według literatury w obliczeniach współczynnika dyfuzji temperatury betonu przyjmowane są stałe wartości ciepła właściwego na poziomie  $0,84-1,20 \text{ kJ/kgK}$  [1,3,4,8,11]. Znane są także próby

przedstawienia wartości ciepła właściwego w zależności od stopnia przemian energetycznych betonu, podobnie jak współczynnika przewodzenia ciepła betonu. Wartość ciepła właściwego uzależniono od stopnia hydratacji cementu ( $\alpha$ ) oraz ciepła właściwego suchego betonu ( $c_0$ ) (11) [6]:

$$c_b = c_c(1,25 - 0,25\alpha), \quad (11)$$

### 3. Funkcje źródeł

Przemianom fazowym występującym w twardniejącym betonie towarzyszą przemiany energetyczne. Charakter przebiegu procesów egzotermicznych związany jest ze zmieniającą się gęstością przepływającego strumienia ciepłego pomiędzy dojrzewającym betonem a środowiskiem zewnętrznym, uzależnioną od mocy wewnętrznego źródła ciepła oraz od intensywności oddawania go do otoczenia w czasie. W celu wyznaczenia pól temperatur w twardniejącym betonie w oparciu o klasyczne równanie przewodnictwa ciepłego Fouriera, uwzględniającego wewnętrzne źródło ciepła, należałoby określić gęstość strumienia ciepła hydratacji cementu w betonie. Trudności w analitycznym opisie tego przebiegu dotyczą odwzorowania zmieniających się w czasie właściwości betonu oraz warunków jego dojrzewania. W praktyce przedstawia się możliwość opisu przebiegu hydratacji cementu za pomocą funkcji źródeł [1,4,6,9,14,15]. Mogą one być wyznaczone za pomocą wzorów empirycznych określonych na podstawie badań doświadczalnych. Parametrem opisującym wpływ temperatury na dojrzewanie betonu jest wskaźnik dojrzałości [1,5,10,12,15]. Wskaźnikiem opisującym miarę dojrzałości betonu jest stopień hydratacji cementu. Funkcje źródeł uwzględnione są między innymi w oparciu o koncepcje funkcji temperatury, gdzie  $Q_{pot/lim}$  oznacza potencjalne/graniczne ciepło hydratacji cementu,  $\alpha$  określa stopień hydratacji cementu w betonie (12) [12]:

$$q(T(t)) = Q_{pot/lim} \frac{\partial \alpha}{\partial t_e} \cdot \frac{\partial t_e}{\partial t}. \quad (12)$$

Wskaźnik dojrzałości oznaczony jako  $t_e$  uzależniono od energii aktywacji  $A$  oraz uniwersalnej stałej gazowej  $R$ . Wielkość tę można wyznaczyć wg wzoru (13):

$$t_e = \int e^{\left[ \frac{A}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right) \right]} dt \quad (13)$$

Na bazie parametrów modelowych ( $a, b$ ) Wesche (14) i Byfors (15) uzależnili  $\alpha$  od wieku betonu.

$$\alpha = e^{(\alpha \cdot r)} \quad (14)$$

$$\alpha = e^{(-\alpha \cdot \ln(r_e) \cdot r^{\alpha})} \quad (15)$$

Marx na podstawie badań modelowych stwierdził, iż stopień hydratacji cementu zależy od wieku betonu oraz czynnika prędkości dojrzewania, a Jonasson rozszerzając funkcję Byforsa wprowadził wskaźnik dojrzałości oraz stałą czasową. Parametr  $\alpha$  zależy według Kirchnera od wieku betonu oraz ciepła hydratacji cementu po 7 i 28 dniach. Reinhardt, Blaauwendraad i Jongendijk zaproponowali wyznaczenie gęstości strumienia ciepła hydratacji cementu według wzoru (16) [10]:

$$q(r) = F \cdot f_1(T) \cdot f_2(r) \quad (16)$$

Funkcję  $f_1(T)$  uzależniono od temperatury twardnienia betonu oraz stałej Arrheniusa. Funkcję  $f_2(T)$  określono za pomocą parametrów modelowych oraz stopnia reakcji powiązanej liniowo ze stopniem hydratacji. Fischer, Smuda, Wolfersdorf i Herold przedstawili prędkość zmian ciepła hydratacji wyrażonej wzorem (17), gdzie  $q_{max}$  jest maksymalną prędkością wydzielanego ciepła [10].

$$q = q_{max} \cdot f(Q) \cdot R(T) \quad (17)$$

Funkcję  $R(T)$  uzależniono od temperatur oraz parametrów modelowych. Funkcja  $f(Q)$  zależy od ilości wydzielonego ciepła oraz także od parametrów modelowych. Zestawienie oraz porównanie funkcji opisujących wielkość ciepła hydratacji cementu w betonie szeroko omówiono w pracach [1,6]. Przeprowadzone analizy wykazały znaczne różnice w przyjmowanych wartościach rozpatrywanych funkcji, szczególnie w początkowym okresie twardnienia betonu.

#### 4. Podsumowanie

Określenie wpływu osłony termoizolacyjnej na procesy wiązania i twardnienia tworzyw cementowych w niskich temperaturach otoczenia wymaga szczegółowej identyfikacji parametrów termofizycznych, opisujących właściwości twardniejącego betonu, celem wyznaczenia funkcji źródeł adekwatnych do lokalnych warunków jego dojrzewania. Na podstawie eksperymentalnych badań własnych można stwierdzić, iż w modelowanych elementach betonowych o małej masywności decydujący wpływ na końcowe właściwości betonu ma pierwsza doba. W tym okresie czasu występujące zmiany energetyczno-fazowe betonu wskazują na złożoność zagadnienia i trudności związane z określeniem współczynników termofizycznych, przyjmowanych często tak jak dla stwardniałego betonu,

co w znacznym stopniu wpływa na uzyskiwane wyniki [1,8,9,14,15]. Określane funkcje źródeł są często rozbieżne i niejednoznaczne. Wskazują na to analizy zawarte w pracach [1,6,10]. W literaturze przyjmuje się, że przebieg zjawisk termicznych w betonie jest identyczny ze zjawiskami zachodzącymi w zaczynie cementowym, co wiąże się z przyjmowaniem ciepła hydratacji cementu jako ciepła twardnienia betonu. Brak jest określenia jednoznacznego wpływu kruszywa na ilość wydzielanego ciepła twardnienia lub wpływ ten jest pomijany. Zasadność tego jest jednak kwestionowana w pracach [1,9,14,15]. Stwierdzono, iż w przypadku zakresów temperatur dojrzewania poniżej 10°C przyjmowanie pewnych funkcji opisujących ciepło hydratacji nie będzie odpowiadać rzeczywistości, a uzyskiwane wyniki będą obarczone błędem [15]. Określenie wpływu osłony termoizolacyjnej na wiązanie i twardnienie betonu w niskich temperaturach otoczenia możliwe będzie poprzez wyznaczenie zmiennych pól temperatur w czasie. Założono, że analizowany problem zostanie rozwiązany za pomocą zagadnień odwrotnych przepływu ciepła. W celu rozwiązania postawionego problemu niezbędne będą dane uzyskane poprzez badania eksperymentalne o skutkach przebiegających procesów. Zostaną one przedstawione za pomocą pomiaru temperatur w charakterystycznych punktach analizowanego układu beton- osłona termoizolacyjna- środowisko zewnętrzne. Uzyskane w ten sposób wielkości, będące wynikiem przebiegu procesu twardnienia, będą stanowiły podstawę do wyznaczenia charakterystyk, pozwalających na określenie warunków betonowania w niskich temperaturach otoczenia.

## LITERATURA

1. Andreasik M.: Naprężenia termiczno-skurczowe w masywach betonowych. Praca doktorska. Kraków. 1982.
2. Barrow G.M.: Chemia fizyczna. PWN, Warszawa 1976.
3. Cammerer J.S.: Izolacje ciepłochronne w przemyśle. Arkady, Warszawa 1967.
4. Kiernożycki W.: Betonowe konstrukcje masywne. Polski Cement. Kraków 2003.
5. Kirchner G.: Vorschlag zum Ermitteln von Temperaturverläufen infolge Hydratationswärme. Beton-und Stahlbetonbau 89, 1994, Heft 7.
6. Klemczak B.: Lepko-sprężysto-plastyczny model materiałowy do numerycznej symulacji zjawisk zachodzących we wczesnym okresie dojrzewania betonu. Praca doktorska, Gliwice 1999.
7. Krause H., Pichocki E.: Kształtowanie struktury zwartych betonów ze względu na ich przewodność cieplną i wytrzymałość na ściskanie. Maszynopis, Gliwice 1972.

8. Kurzawa J., Kiernożycki W.: Uwarunkowania technologiczne w procesie realizacji elementów i konstrukcji masywnych z betonu. Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej Nr 441, Szczecin 1991.
9. Kurzawa J., Kiernożycki W., Kaszyńska M.: Funkcje źródeł ciepła twardnienia cementów stosowanych do budowy masywów betonowych. Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej, Nr 348, Szczecin 1987.
10. Müller J.: Reifeparameter zur bestimmung der temperaturabhängigen Eigenschaften des erhärtenden Betons. TU, Dresden 2002.
11. Neville A.M.: Właściwości betonu. Wyd. 4, Polski Cement, Kraków 2000.
12. Rostasy F., Krauß M; Budelmann H: Planungswerkzeug zur Kontrolle der frühen Rißbildungen in massigen Betonbauteilen. Bautechnik 2002, Heft 7/8.
13. Szargut J.: Modelowanie numeryczne pól temperatury. WNT, Warszawa 1992.
14. Ślusarek J.: Termiczne naprężenia własne w masywnych elementach budowlanych z betonów wysokowartościowych. Praca doktorska, Szczecin 1996.
15. Witakowski P.: Termodynamiczna teoria dojrzewania. Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy Nr 1, Kraków 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Klemm

## Abstract

So that to evaluate influence of a thermal insulation cover on hardening concrete in low temperatures, it is necessary to define variable temperature fields in concrete. The problem is supposed to be solved by inverse task of heat flow. To solve the problem, experimental data of temperature measurements have been done. Values of temperatures in appropriate points of hardening concrete let to define thermal curves. Characteristics received in that way give an information about required insulation thickness to define an optimal conditions for concreting in low temperatures.