

Paweł KRAUSE*
Politechnika Śląska

EGZOTERMIA MIESZANKI BETONOWEJ W OSŁONIE TERMOIZOLACYJNEJ

Streszczenie. Przedstawiono próbę oceny egzotermii mieszanki betonowej w osłonie termoizolacyjnej, w oparciu o przyjęty model podobieństwa. Zaproponowana metoda pozwoli na określenie korzystnych warunków dojrzewania poprzez wyznaczenie współczynnika bezwymiarowej temperatury.

EXOTHERMIC PROPERTIES OF CONCRETE MIX UNDER THERMOINSULATION COVER

Summary. In the paper a proposal of exothermic properties of concrete mix under thermoinsulation cover, basing on similarity model is presented. The proposed method can define advantageous conditions of curing by calculation of undimensional temperature coefficient.

1. Wprowadzenie

Procesy wiązania i twardnienia tworzyw cementowych są wynikiem reakcji chemicznych zachodzących pomiędzy jego składnikami. Reakcje te są reakcjami egzotermicznymi, czyli wydzielającymi ciepło. Ogólnie ciepło to nazywamy ciepłem hydratacji. Uwolnienie energii cieplnej w mieszance betonowej jest wynikiem [1], [8], [10]:

- zwilżania cementu,
- hydrolizy i hydratacji składników cementu,
- hydratacji produktów przejściowych,
- adsorpcji wody produktów hydratacji
- pozostałych przemian fazowych.

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

Występująca różnica temperatur pomiędzy samonagrzewającym się w trakcie wiązania i twardnienia elementem betonowym wywołuje ruch ciepła i masy, w tym do otoczenia, poprzez ograniczające powierzchnie zewnętrzne. Można przyjąć, że przebieg temperatur i ich rozkład w formowanym elemencie, towarzyszący procesom wiązania i twardnienia tworzyw cementowych, decyduje o końcowych właściwościach stwardniałego betonu, szczególnie o wytrzymałości i skurczu. W przypadku naturalnych warunków dojrzewania mieszanki betonowej, gdy cement, woda oraz kruszywo mają temperaturę zbliżoną do temperatury otoczenia, temperatura na powierzchni formowanego elementu nie różni się w sposób znaczący od temperatury w jego wnętrzu. W warunkach małych gradientów temperatury zminimalizowany jest wpływ odkształceń termicznych w elemencie. Rozpatrywane zagadnienie nie obejmuje elementów masywnych.

Problem występowania niekorzystnych gradientów temperatury pojawia się w przypadku prowadzenia robót betonowych w zbyt wysokich lub niskich temperaturach otoczenia. Obniżona temperatura środowiska zewnętrznego w stosunku do normalnych warunków termicznych otoczenia wpływa niekorzystnie na mieszankę betonową, pozostającą w deskowaniu w okresie wiązania i twardnienia tworzywa cementowego. Przy niskich temperaturach otoczenia intensywniej postępujące procesy egzotermiczne wewnątrz mieszanki betonowej, w stosunku do wolniej postępującego procesu na jej powierzchni, prowadzą do powstawania zwiększonych gradientów temperatur. W przypadku wystąpienia dużego gradientu temperatur istnieje możliwość powstawania zbyt dużych naprężeń w betonie, mogących spowodować spękania, zarysowania, a także zniszczenia elementu wskutek odkształceń termicznych.

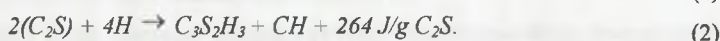
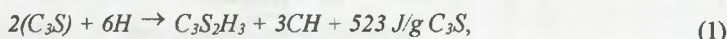
Na kinetykę procesu wiązania i twardnienia tworzywa cementowego w formowanym elemencie zasadniczo wpływają takie czynniki, jak: rodzaj zastosowanego cementu, ilość wody (wyrażonej przez wskaźnik w/c), ilość i rodzaj kruszywa, sposób zagęszczenia, temperatura mieszanki betonowej oraz otoczenia, kształt betonowanego elementu, rodzaj zastosowanych dodatków chemicznych.

2. Egzotermia tworzyw cementowych

Określenie przebiegu egzotermii mieszanki betonowej można przeanalizować na najprostszej postaci betonu, którym jest zaczyn cementowy. Każde spoiwo, w tym cement, zawiera określoną ilość substancji chemicznie aktywnych i nieaktywnych [1].

Przebieg reakcji chemicznych i procesów fizycznych towarzyszących zmieszaniu cementu z wodą, zwany hydratacją, uzależniony jest w dużym stopniu od składu chemicznego i uziarnienia zastosowanego cementu.

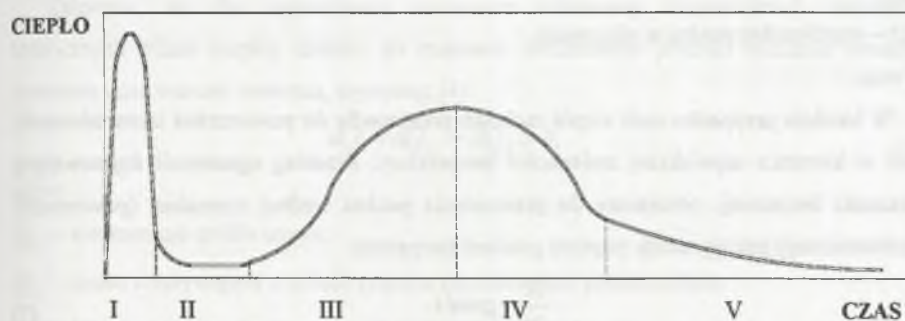
Na intensywność przebiegu procesu hydratacji cementu, jako materiału wielofazowego, wpływa szybkość reakcji poszczególnych faz z wodą. Głównymi składnikami wiążącymi w cemencie są krzemian trójwapniowy (C_3S) oraz krzemian dwuwapniowy (C_2S). Przebieg reakcji chemicznych faz ortokrzemianowych wraz z ich egzotermią przedstawiają wzory [8]:



Na ciepło powyższych reakcji wpływa zarówno ciepło hydratacji, jak i ciepło adsorpcji wody przez żel CSH . Ciepło hydratacji powyższych faz ma wartość: dla fazy C_3S –404 J/g, dla fazy C_2S –102,6 J/g [8]. Oprócz powyższych przemian wydzielanie się ciepła związane jest także z fazą C_3A oraz innymi związkami aktywnymi. Znając skład mineralny cementu oraz ciepło hydratacji poszczególnych faz, można określić jego egzotermię. Według Neville'a ciepło hydratacji 1g cementu można wyznaczyć na podstawie wyrażenia [10]:

$$136 (C_3S) + 62 (C_2S) + 200 (C_3A) + 30 (C_4AF). \quad (3)$$

Schematyczny przebieg procesu wydzielania się ciepła (wg krzywej kalorymetrycznej) w zaczynie cementowym, z zaznaczonymi charakterystycznymi okresami egzotermii przedstawiono na rys. 1 wg [2].



Rys. 1. Typowa krzywa mikrokalorymetryczna zaczynu cementowego
Fig. 1. A typical microcalorimetric curve of cement paste

Największa egzotermia występuje w okresach III i IV, czyli w momencie tworzenia się uwodnionych związków chemicznych w tworzywie cementowym. Ilość ciepła wydzielanego od początku przebiegu egzotermii cementu $Q(\tau)$ do określonego czasu τ można wyrazić wzorem [2]:

$$Q(\tau) = \int_0^{\tau} W(t) dt, \quad (4)$$

gdzie:

$W(t)$ – moc cieplna.

Charakterystyczna wielkość egzotermii Q_e oznacza niezbędną ilość ciepła zapewniającą korzystne warunki wiązania i wzrostu wytrzymałości tworzyw cementowych w czasie τ .

$$Q_e = \lim_{\tau \rightarrow \tau_1} Q(\tau). \quad (5)$$

3. Wymiana ciepła

Charakter przebiegu procesu egzotermicznego związany jest ze zmieniającą się gęstością przepływającego strumienia ciepłego pomiędzy dojrzewającą mieszanką betonową a otoczeniem zewnętrznym. Wyznaczenie tego przebiegu będzie możliwe poprzez wyznaczenie rozkładów pól temperatur w funkcji czasu. Zmienne w czasie wielkości temperatur dojrzewającej mieszanki betonowej będą uzależnione od ich usytuowania w elemencie. Pole temperatur opisuje funkcja zmiennych położenia i czasu:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (6)$$

gdzie:

x, y, z – współrzędne punktu w elemencie,

τ – czas.

W każdym przypadku ruch ciepła zachodzi prostopadle do powierzchni izotermicznych, czyli w kierunku największej zmienności temperatury. Przebieg egzotermii dojrzewającej mieszanki betonowej, odniesiony do przesunięcia punktu wzdłuż normalnej (powierzchni egzotermicznej) jest wyrażony poprzez gradient temperatur

$$\frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t \quad (7)$$

oraz prawo Fouriera

$$q = -\lambda \text{ grad } t. \quad (8)$$

W dojrzewającej mieszance betonowej na skutek reakcji egzotermicznych wyzwała się określona ilość ciepła (4). W przypadku tym mamy do czynienia ze zmieniającym się wewnętrznym źródłem ciepła. Wydajność objętościowa tego źródła określona jest poprzez stosunek ilości wydzielonego ciepła do objętości i czasu.

$$q_v = \frac{dQ_{zr}}{dV}, \quad (9)$$

gdzie:

Q_{zr} – wewnętrzne źródło ciepła,

V – objętość.

Na podstawie własnych badań przyjęto, że w przypadku występowania ujemnych temperatur otoczenia można zapewnić przebieg procesu dojrzewania mieszanki betonowej poprzez zastosowanie osłony o odpowiednim oporze cieplnym.

W analizie wymiany ciepła pomiędzy mieszanką betonową a środowiskiem zewnętrznym występuje złożony układ wielowarstwowy o zróżnicowanej konduktancji. Układ ten składa się z wewnętrznego źródła ciepła oraz osłony termoizolacyjnej. Wewnętrzne źródło ciepła charakteryzuje się zmiennymi gradientami temperatur w czasie (rys. 1) oraz zmieniającym się oporem cieplnym mieszanki betonowej. Osłona termoizolacyjna, o stałym oporze cieplnym, wpływa na kształtowanie gradientów temperatur w mieszance betonowej, zabezpieczając ją przed niekorzystnymi wpływami otoczenia.

Przebieg zmienności temperatur w układzie będzie uzależniony od mocy wewnętrznego źródła ciepła oraz od intensywności jego oddawania do otoczenia. Przyjęto, że w warunkach obniżonych temperatur zewnętrznych proces egzotermiczny powinien przebiegać w temperaturze wyższej od temperatury zamarzania wody.

Założono, że dla zapewnienia mieszance betonowej odpowiednich warunków termicznych bilans cieplny układu, do momentu zakończenia procesu wiązania cementu, powinien mieć wartość dodatnią, wynosząc [4]:

$$dQ = dQ_{zr} - dQ_{\lambda} > 0, \quad (10)$$

gdzie:

Q_{zr} – wewnętrzne źródło ciepła,

Q_{λ} – ciepło wypływające z układu poprzez ograniczające powierzchnie.

Na podstawie przekształceń zawartych w literaturze wynika, że:

$$Q_{zr} - Q_{\lambda} = \frac{dI}{d\tau} > 0. \quad (11)$$

gdzie:

wewnętrzny strumień ciepła układu:

$$Q_{zr} = \int_V q_v dV \quad (12)$$

strumień ciepła wypływający z układu

$$Q_{\lambda} = - \int_V \nabla q dV, \quad (13)$$

Po przeprowadzeniu przekształceń otrzymano [4]:

$$\int_V (q_v + \nabla q) dV = \int_V c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} dV > 0 \quad (14)$$

Po połączeniu (14) z prawem Fouriera (8) otrzymamy równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia ciepła (Fouriera-Kirchhoffa), uwzględniające egzotermię mieszanki betonowej.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = q_v - \nabla(\lambda \nabla T) > 0. \quad (15)$$

Przyjmując sprowadzony współczynnik przewodzenia ciepła mieszanki betonowej λ oraz $c\rho$ jako wartość stałą, równanie przyjmuje postać:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{q_v}{c\rho} - a \nabla^2 T > 0, \quad (16)$$

gdzie:

a – współczynnik wyrównania temperatury,

$c\rho$ – pojemność cieplna.

Dla poprawnego rozwiązania powyższego równania różniczkowego należy ustalić następujące warunki jednoznaczności rozwiązania poprzez określenie [3]:

- kształtu i wymiaru ciała,
- właściwości fizycznych mieszanki betonowej oraz rozkładu wewnętrznych źródeł ciepła,
- rozkładu temperatur w chwili początkowej,
- wymiany ciepła na powierzchni ciała.

4. Modelowanie zjawiska transportu ciepła

W przyjętym układzie, w poszczególnych jego punktach, ruch ciepła występuje w zakresie trójwymiarowego pola temperatur (4). W przypadku nieustalonego przepływu ciepła podobieństwo przyjętego modelu jest pewnego rodzaju przybliżeniem [7].

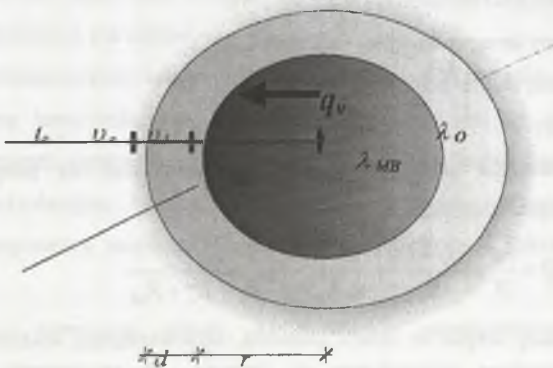
W celu rozwiązania zagadnienia transportu ciepła w układzie mieszanka betonowa-ostona termoizolacyjna rozpatrzono jednowymiarowy przepływ ciepła. Zmienne oddziaływanie wewnętrznego źródła ciepła w formowanym elemencie, znajdującym się w ostonie termoizolacyjnej, powoduje jego odpowiedź wyrażoną temperaturami w zależności

od oporu cieplnego termoizolacji. Egzotermia elementu może być wyrażona zarówno poprzez gęstość strumienia cieplnego (w pomiarach trudna do wyznaczenia), jak również poprzez charakterystyczne temperatury, określające przebieg wymiany ciepła, które można wyrazić za pomocą bezwymiarowej temperatury [4], [7].

W celu pominięcia wpływu zróżnicowania kształtu elementu do modelowania procesu przyjęto hipotetyczny model kuli (rys. 2) o promieniu r , z wewnętrznym niestalonym źródłem ciepła, osłonięty warstwą izolacji termicznej grubości d , o stałym oporze cieplnym R .

Przyjęty uproszczony model uwzględnia egzotermię mieszanki betonowej, wyrażając możliwe do określenia charakterystyczne temperatury. Założenia dotyczące uproszczonego modelu:

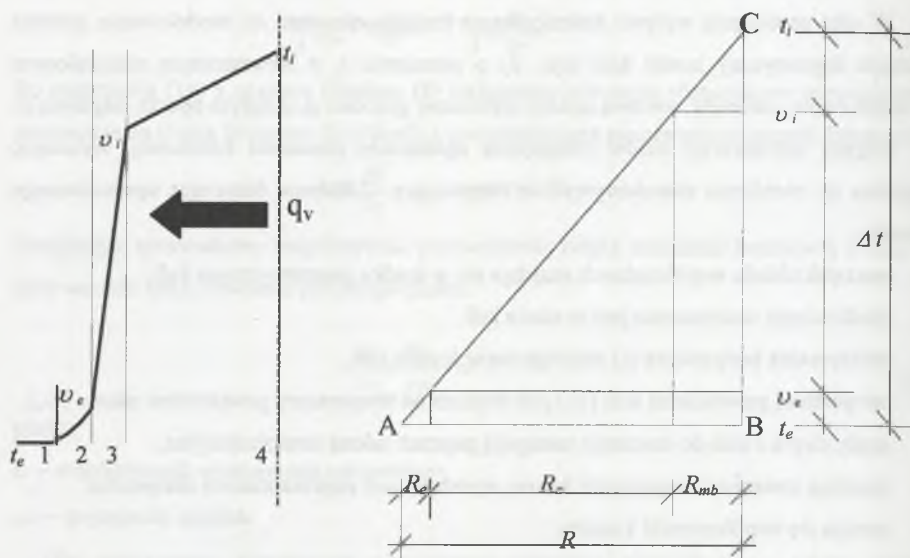
- początek układu współrzędnych znajduje się w środku geometrycznym kuli,
- źródło ciepła umieszczone jest w masie kuli,
- maksymalna temperatura (t_i) znajduje się w środku kuli,
- temperatura powierzchni kuli (ν_i) jest większa od temperatury powierzchni osłony (ν_e),
- straty ciepła z kuli do otoczenia następują poprzez osłonę termoizolacyjną,
- przebieg zmienności egzotermii betonu wyrażony jest poprzez różnice temperatur,
- pomija się współczynniki kształtu,
- materiał masy kuli oraz osłony termoizolacyjnej jest jednorodny i izotropowy,
- przyjęto stały zastępczy współczynnik λ mieszanki betonowej,
- zachodzi warunek $t_i > \nu_i > t_e$,
- w okresie wiązania tworzywa cementowego $\nu_i > 0$ °C.



Rys. 2. Model układu mieszanka betonowa – osłona termoizolacyjna

Fig. 2. Model of concrete mix – thermoinsulation cover scheme

Opis egzotermii formowanego elementu w przyjętym modelu będzie wyrażony poprzez gradienty charakterystycznych odpowiednich temperatur. Schemat wyjściowego modelu pola temperatury przy jednowymiarowym przepływie ciepła przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Hipotetyczny model podobieństwa ustalonych pól temperatur
Fig. 3. Hypothetical model of similarity of settled temperature fields

gdzie:

R_{mb} – opór cieplny mieszanki betonowej (warstwa 3-4),

R_o – opór cieplny osłony termoizolacyjnej (warstwa 2-3),

R_e – opór przyjmowania ciepła (warstwa 1-2),

t_i, t_e, v_i, v_e – temperatury.

W powyższym modelu poszczególne różnice temperatur są proporcjonalne do odpowiadających im oporów cieplnych.

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{v_e - t_e}{R_e} = \frac{v_i - t_e}{R_e + R_o} = \frac{t_i - t_e}{R_e + R_o + R_{mb}} \quad (17)$$

Założono stabilizację ciepła w chwili pomiaru, odpowiadającą lokalnej równowadze termodynamicznej (ustalony przepływ ciepła). Rozkład temperatur w modelowanym przekroju będzie zależał od temperatur t_i, t_e, v_i, v_e oraz oporów cieplnych R_{mb}, R_o, R_e .

Jako charakterystykę bezwymiarowej temperatury egzotermii mieszanki betonowej przyjęto:

$$\frac{R_e + R_o}{R_e + R_o + R_{mb}} = \frac{v_i - t_e}{t_i - t_e} = \Theta \quad (18)$$

Zakładając, że $v_e \approx t_e$, upraszcza się wpływ środowiska zewnętrznego na pomiar temperatur w czasie procesu dojrzewania tworzywa cementowego. Przyjmując, że poszczególne pomiary temperatur traktowane są jako wielkości chwilowe, otrzymamy [7]:

$$\Theta_j = \frac{v_j - t_{ej}}{t_j - t_{ej}} \quad (19)$$

Dla wymaganego przebiegu procesu wiązania i twardnienia mieszanki betonowej charakterystyka temperaturowa jest średnią n pomiarów w czasie τ :

$$\Theta_{\mu} = \sum_{j=1}^n \Theta_j \quad (20)$$

5. Podsumowanie

Podczas prowadzenia robót betonowych w obniżonych, szczególnie w ujemnych, temperaturach (bez udziału dodatków chemicznych w mieszance betonowej) istnieje niebezpieczeństwo obniżenia końcowych właściwości betonu lub nawet całkowitej jego destrukcji.

Dla zapewnienia odpowiednich warunków przebiegu procesów wiązania i twardnienia tworzyw cementowych egzotermia mieszanki betonowej powinna przebiegać w środowisku zbliżonym do naturalnych warunków.

W celu zagwarantowania odpowiednich warunków dojrzewania można zastosować zewnętrzną osłonę termoizolacyjną, uzależniając jej opór cieplny od masy i kształtu formowanego elementu, ograniczając przez to transport wydzielanego ciepła do otoczenia.

Ostona termoizolacyjna będąca elementem deskowania pozwoli na zachowanie odpowiedniej temperatury mieszanki betonowej w określonym zakresie niekorzystnych temperatur.

Dobór izolacji termicznej osłony, na podstawie zaproponowanej charakterystyki bezwymiarowej temperatury Θ , pozwoli na regulowanie gradientów temperatur w formowanym elemencie betonowym.

LITERATURA

1. Bukowski B.: Budownictwo betonowe, technologia betonu, cz. I, Wyd. 1, Arkady, Warszawa 1963.
2. Czamarska D., Witakowski P.: Wpływ H_3BO_3 na szybkość wydzielania ciepła w procesie hydratacji cementu, Cement Wapno Gips, 3/91.
3. Furmański P., Domański R.: Wymiana ciepła, Wyd. 1, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
4. Gdula S.: Przewodzenie ciepła, Wyd. 1, PWN, Warszawa 1984.
5. Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki, Wyd. 3, WNT, Warszawa 1968.
6. Kaćki E.: Termokinytyka, Wyd. 1, WNT, Warszawa 1967.
7. Krause H.: Podstawy temperaturowej diagnostyki izolacyjności cieplnej przegród budowlanych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993.
8. Kurdowski W.: Chemia cementu, Wyd. 1, PWN, Warszawa 1991.
9. Madejski J.: Teoria wymiany ciepła, PWN, Warszawa 1963.
10. Neville A.M.: Właściwości betonu, Wyd. 4, Polski Cement, Kraków 2000.
11. Wiśniewski S.: Wymiana ciepła, Wyd. 1, PWN, Warszawa 1979.
12. PN – 88 – B – 06250 – Beton zwykły.

Recenzent: Dr hab. inż. Janusz Mierzwa

Abstract

To secure appropriate conditions for binding and hardening cement materials, exothermics of concrete mix should take place in environment similar to natural conditions. To guarantee proper conditions for hardening of concrete mix, a thermoinsulation cover can be apply. Because a thermal resistance depends on mass and shape of forming element this cause reduction of heat transport to external environment. A thermoinsulation cover, as a part of forming plates, can keep a suitable temperature of concrete mix. A choice of thermal insulation of the cover, based on proposed characteristics of undimensional temperature can be useful for a control of temperature gradients in formed concrete element.