

PODSTAWOWE RÓWNANIA MODELU DEGRADACJI OTULINY W WYNIKU KOROZJI ZBROJENIA

Tomasz KRYKOWSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

1. Wstęp

Degradacja otuliny betonowej w wyniku korozji zbrojenia jest procesem dwuetapowym. Etap pierwszy (faza inicjacji) jest związany z transportem substancji agresywnych, wilgoci oraz ciepła w otulinie. Etap ten kończy się wraz z inicjacją procesu korozji zbrojenia. Etap drugi (faza propagacji) polega na degradacji otuliny betonowej w wyniku gromadzenia się w strefie przejściowej otuliny produktów korozji, które zwiększając swoją objętość powodują powstawanie naprężeń dystorsyjnych. Pomiedzy ilością produktów korozji a ilością jonów żelaza wynoszoną do roztworu istnieje zależność liniowa [1]. Zależność ta (po uwzględnieniu prawa Faradaya) jest funkcją zależną od natężeniem prądu korozyjnego I [2], [3]. Celem pracy jest sformułowanie modelu, który pozwoli na obiektywny opis procesu degradacji otuliny betonowej w wyniku korozji zbrojenia zarówno w fazie inicjacji jak i propagacji.

2. Model termomechaniczny zagadnienia

Analizując proces wytwarzania produktów korozji trzeba zwrócić uwagę na budowę strefy przejściowej: stal – beton. W wyniku reakcji elektrochemicznych na styku pomiędzy zbrojeniem a otuliną wytwarzają się dwie warstwy: warstwa produktów korozji oraz warstwa będąca mieszaniną produktów korozji i matrycy cementowej [4]. Istnienie strefy przejściowej o takiej budowie stanowi przesłankę do zastosowania w opisie matematycznym zagadnienia teorii ośrodków wieloskładnikowych.

Cechą charakterystyczną zjawiska korozji zbrojenia w betonie są przepływy cząstek elektrycznie nieobojętnych [5]. Ze względu na duże trudności przy modelowaniu takich zagadnień – wpływ pola elektromagnetycznego jest zwykle pomijany. Mechaniczny efekt oddziaływań korozyjnych uwzględnia się poprzez wprowadzenie odkształceń dystorsyjnych zależnych od dodatkowego parametru wewnętrznego, który jest funkcją natężenia prądu korozyjnego [2]. Analiza przebiegu reakcji anodowej i katodowej (substratów i produktów biorących udział w reakcjach) oraz efektów towarzyszących obu reakcjom chemicznym pozwala na sformułowanie postulatów o minimalnej liczbie składników, którą trzeba uwzględnić w opisie degradacji otuliny, która wynosi sześć:

- Szkielet złożony z matrycy cementowej wraz z kruszywem – składnik $\pi=0$ (zakładamy, że tlen stanowi integralną część szkieletu).

- Substancja agresywna (jony chlorkowe) migrująca w porach betonu – składnik $\pi=1$. Substancja agresywna inicjuje proces korozji zbrojenia.
- Woda migrująca w porach betonu – składnik $\pi=2$.
- Para wodna migrująca w porach betonu – składnik $\pi=3$.
- Substraty reakcji chemicznej (jony żelaza i jony wodorotlenowe), w wyniku której dochodzi do powstania produktów korozji zbrojenia – składnik $\pi=4$.
- Produkty reakcji chemicznej – składnik $\pi=5$.

Zakładamy, że pomiędzy wodą i parą wodną dochodzi do przemian fazowych. Z definicji pomiędzy substratami i produktami reakcji zachodzi reakcja chemiczna. Postęp tej reakcji jest scharakteryzowany funkcją natężenia prądu korozyjnego I . Do opisu ewolucji natężenia prądu korozyjnego w czasie wykorzystano podejście empiryczne (podejście racjonalne ze względu na złożony skład chemiczny cieczy porowej) [6]. Mając na uwadze wszystkie powyższe spostrzeżenia, równania bilansu opisujące problem przyjmą postać:

- Bilans masy jonów chlorkowych [1], [2]

$$\rho \frac{dc_1}{dt} + \text{div} \mathbf{j}_1 = 0, \quad \mathbf{j}_1 = -\rho D_c \text{grad} c_f - \rho c_f D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \text{grad} \varphi, \quad c_1 = (1 + \alpha) c_f, \quad \alpha = \frac{c_{bc}}{c_f}, \quad (1)$$

- Bilans masy wilgoci [7], [8],

$$\rho_w \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \frac{dc_3}{dt} + \text{div} \mathbf{J}_2 + \text{div} \mathbf{j}_3 = \tilde{c}_2 + \tilde{c}_3, \quad \tilde{c}_2 + \tilde{c}_3 \cong 0, \quad w = \frac{\rho_2}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_2 = -\rho_w D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \text{grad} \varphi, \quad \mathbf{j}_3 = -\frac{\delta}{\mu} \text{grad} p, \quad \rho \frac{dc_3}{dt} \cong 0,$$

- Bilans pędu [2],

$$\text{div} \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} = 0, \quad \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \left(\boldsymbol{\varepsilon}^e - \boldsymbol{\mu} \Delta T - \boldsymbol{\chi} \Delta I^e - \sum_{\pi} \xi_{\pi} \Delta c_{\pi} \right), \quad I^e = \int_0^t I(t) dt, \quad (3)$$

- Bilans energii [7], [8],

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) + \tilde{c}_3 \tilde{L}, \quad \tilde{L} = (M_3 - M_2), \quad \tilde{c}_3 = \text{div} \mathbf{j}_3 + \rho \frac{\partial c_3}{\partial t} \cong \text{div} \mathbf{j}_3, \quad (4)$$

- Funkcja empiryczna opisująca ewolucję gęstości prądu korozyjnego [6],

$$I = A_c a_1 \exp \left(a_2 + a_3 \ln(a_4 c_1) - \frac{a_5}{T} - a_6 R_r + a_7 t^{a_8} \right), \quad R_r = R_r(\varphi). \quad (5)$$

3. Sformułowanie problemu i sposób rozwiązania

Analizę zagadnienia wykonuje się w trzech etapach:

- Rozwiązanie problemu transportu ciepła i wilgoci. Zagadnienie to, zdefiniowane równaniami (2) i (4), można rozwiązać wykorzystując program WUFI [8].
- Analiza transportu jonów chlorkowych do powierzchni pręta zbrojeniowego. Przekroczenie koncentracji krytycznej powoduje inicjację procesu korozji zbrojenia o intensywności zdefiniowanej zależnością (5). Sformułowanie przyrostowe równania

otrzymamy na podstawie linearyzacji po czasie formy słabej równania bilansu masy substancji agresywnej (1),

$$\int_V \delta c_f \frac{(c_{f_{n+1}} - c_{f_n})}{\Delta t} dv + \int_V \text{grad } \delta c_f \cdot \bar{D}_c \cdot \text{grad } c_f dv = \int_V \delta c_f \text{grad } c_f \cdot \bar{D}_\varphi \cdot \text{grad } \varphi dv + \int_V \delta c_f c_f \text{div}(\bar{D}_\varphi \cdot \text{grad } \varphi) dv + \int_V \delta c_f \cdot \bar{D}_c \cdot \text{grad } c_f \mathbf{n} da, \quad \bar{D}_c = \frac{D_c}{1 + \alpha}, \quad \bar{D}_\varphi = \frac{D_w}{(1 + \alpha)} \frac{\partial w}{\partial \varphi}. \quad (6)$$

- Wyznaczenie czasu pęknięcia otuliny betonowej z wykorzystaniem równań teorii plastyczności. Sformułowanie przyrostowe zagadnienia otrzymamy w wyniku linearyzacji formy słabej równania bilansu pędu (3),

$$\int_V \text{grad } {}^s \delta \mathbf{u} : \mathbf{C}_{alg_{n+1}}^{ep\ k} : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{k+1} dv = \delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{F}_{n+1} - \int_V \text{grad } {}^s \delta \mathbf{u} : \mathbf{C}^e : (\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^k - \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{p\ k}) dv + \int_V \text{grad } {}^s \delta \mathbf{u} : \mathbf{C}^e : \boldsymbol{\chi}_{n+1}^e dv, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \text{grad } {}^s \mathbf{u}, \quad \boldsymbol{\chi} = \chi(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_j) \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j. \quad (7)$$

Indeksy n i k w równaniach (6) i (7) odnoszą się odpowiednio do kroków czasowych i do iteracji wynikających z zastosowania metody Newtona - Raphsona.

4. Podsumowanie

Przedstawiony w pracy model jest szkicem rozwiązania problemu. Wykorzystanie tego modelu wymaga sformułowania równań MES oraz rozwiązania sprzężonych równań transportu masy, ciepła i pędu. W przypadku ogólnym współczynniki D_w, D_c, λ zależą od pól koncentracji masy jonów chlorkowych, wilgoci i temperatury. Przedstawiony model w sensie idei jest modelem kompletnym i może być wykorzystany do wyznaczania czasu eksploatacji obiektów budowlanych w przypadku korozji chlorkowej oraz po niewielkich modyfikacjach w przypadku innych bardziej złożonych mechanizmów degradacji materiału.

Oznaczenia symboli

a_i, b_i - współczynniki empiryczne, [-], A_c - powierzchnia na której zachodzi proces korozyjny, [m²], c - ciepło właściwe wilgotnego materiału, [J/kgK], c_π - koncentracja składnika π , [-], c_f, c_{bc} - koncentracja chlorków wolnych (związanych), [-], \tilde{c}_π - źródło masy składnika π , [kg/m³s], \mathbf{C} - tensor sprężystości materiału, [N/m²], \mathbf{C}_{alg}^{ep} - sprężysto-plastyczny algorytmiczny tensor styczny, [N/m²], D_c - współczynnik dyfuzji, [m²/s], D_w - współczynnik przewodzenia kapilarnego, [m²/s], \mathbf{e}_i - jednostkowy wektor bazy, [-], \mathbf{F} - wektor obciążenia, [N], \mathbf{j}_π - dyfuzyjny strumień masy składnika π , [kg/m²s], I - natężenie prądu korozyjnego, [A], \mathbf{J}_π - strumień masy składnika π , [kg/m²s], k_π - współczynnik dyfuzji składnika π , [m²/s], \tilde{L} - ciepło parowania, [J/kg], M_π - potencjał chemiczny składnika π , [J/kg], \mathbf{n} - wektor normalny, [-], p - ciśnienie cząsteczkowe pary wodnej, [Pa], R_r - oporność elektryczna betonu, [Ω], t - czas, [s], T - temperatura, [K], \mathbf{u} - wektor przemieszczenia, [m], w - zawartość wilgoci, [m³/m³], δ - współczynnik dyfuzji pary wodnej, [kg/m·s·Pa], $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ ($\boldsymbol{\varepsilon}^p$) - tensor odkształcenia sprężystego (plastycznego), [-], λ - współczynnik przewodzenia ciepła, [W/m·K], μ - współczynnik oporu dyfuzyjnego

suchego materiału, [-], μ , χ , ζ_{π} - tensory rozszerzalności materiału, [1/°C, 1/A, 1], ρ - gęstość masy, ρ_w - gęstość właściwa wody, [kg/m³], σ - tensor naprężenia, [N/m²], φ - wilgotność względna, [-]

Literatura

- [1] Martin-Perez B.: Service life modeling of r. c. highway structures exposed to chlorides – Ph. D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 1998.
- [2] Krykowski T.: Modeling of concrete cover degradation caused by rebar's corrosion - multicomponent media theory approach, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, 16, 3-4, 2009, p. 241-250.
- [3] Krykowski T., Zybura A.: Fem modeling of concrete cover degradation caused by rebar's corrosion in reinforced concrete, Architecture Civil Engineering Environment – ACEE Journal, 2, 4, 2009, p. 71-80.
- [4] Caré S., Nguyen Q. T., L'Hostis V., Bert Y.: Mechanical properties of the rust layer induced by impressed current method in reinforced mortar, Cement and Concrete Research, 38, 8-9, 2008, p. 1079-1091.
- [5] Zybura A.: Degradacja żelbetu w warunkach korozyjnych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1990.
- [6] Liu Y.: Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures - Ph. D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1996.
- [7] Kubik J., Wyrwał J.: Podstawy fizyki materiałów budowlanych, red. Klemm P.: Budownictwo ogólne - fizyka budowli T. 2, Warszawa, Arkady, 2010, p. 9-52.
- [8] Kunzel H., Radoń J., Zirkelbach D.: Podstawy teoretyczne programu komputerowego WUFI, red. Gawin D., KostECKA E.: Program komputerowy WUFI i jego zastosowanie w analizach ciepłno-wilgotnościowych przegród budowlanych, Politechnika Łódzka, Łódź, 2007, p. 9 - 36.

BASIC EQUATIONS OF CONCRETE COVER DEGRADATION MODEL

Summary

This paper presents the sketch of the model that can be used for the analysis of concrete cover in the corrosion conditions. The application of this model requires formulation of FEM theory equations. The presented model in the sense of idea is complete and can be used for determination of exploitation time of the cover in the case as well of chloride and the other type of corrosion.