

Modelowanie wpływu warunków klimatycznych na szybkość korozji zbrojenia w betonie*

Modeling of the environmental conditions effect on the reinforcement corrosion rate in concrete*

1. Wprowadzenie

Postępujące w konstrukcjach żelbetowych procesy karbonatyzacji, a zwłaszcza wnikania jonów chlorkowych, powodują pogorszenie właściwości ochronnych otuliny i zagrożenie korozyjne stali zbrojeniowej. Po depasywacji stali zbrojeniowej w strefie przejściowej z matrycą cementową zachodzą procesy elektrochemiczne, których szybkość zależy nie tylko od zawartości jonów wywołujących korozję, ale także od wilgotności betonu i temperatury. Opracowane dotychczas modele opisują postęp korozji zbrojenia za pośrednictwem gęstości prądu korozyjnego w stałych warunkach cieplno-wilgotnościowych. Określenie gęstości prądu korozyjnego w zmieniających się w trakcie eksploatacji konstrukcji żelbetowej warunkach jest bardzo trudne i dotychczas nie zostało zadowalająco rozwiązane.

W niniejszej pracy rozważono możliwość modelowania gęstości prądu korozyjnego, charakteryzującego postęp korozji zbrojenia w elemencie żelbetowym, w wyniku dyfuzji jonów chlorkowych oraz zmieniających się warunków klimatycznych, w typowym roku meteorologicznym. Zastosowano znane równania transportu masy i ciepła, które rozwiązano własnym i komercyjnym oprogramowaniem komputerowym, dla typowych właściwości betonu. Przyjmując empiryczną aproksymację gęstości prądu korozyjnego przeprowadzono analizę wpływu stężenia jonów chlorkowych w roztworze w porach betonu, z uwzględnieniem czasu ekspozycji betonu, wilgotności względnej powietrza oraz temperatury otoczenia na zmiany gęstości prądu korozyjnego. Zmiany tych czynników określono obliczając przepływy wody, pary wodnej i ciepła w betonie, w zmieniających się warunkach klimatycznych środowiska.

2. Model matematyczny procesu korozji zbrojenia

W miarę prosty model transportu masy substancji agresywnych, wody, pary wodnej i ciepła w betonie można otrzymać na podstawie

1. Introduction

The development of carbonization and especially chlorides diffusion, causes the deterioration of the protective properties of concrete cover and increases the risk of reinforcement corrosion. After depassivation of steel bar, in contact with the concrete cover, the electrochemical processes, whose intensity depends not only on the content of chlorides and pH of the concrete pore solution, but also on humidity and temperature of environment, are beginning. Until now the proposed models were describing the development of corrosion applying corrosion current density, in constant thermal and humidity conditions. The defining of the corrosion current density in the changeable, during the concrete structure exploitation conditions, is very complicated and has not been solved satisfactorily until now.

In presented work the possibility of the modelling of corrosion current density, defining the corrosion development of the reinforced concrete elements, as a result of chloride diffusion and changing climatic condition in the typical meteorological year, has been taken up. The known transport equations of heat and mass solved using personal and commercial software, for typical concrete properties, has been used. Assuming the empirical approximation of corrosion current density, taking into account the influence of chloride ions concentration in the concrete pores solution, the time of concrete exposition, relative humidity and temperature of the environment on the corrosion current density changes has been analysed. The changes of these factors, calculating the flows of water, water vapour and heat in concrete in the changing climatic conditions of the environment have been defined.

2. The model of reinforcement corrosion

A reasonably simple mass transport model of aggressive substances and water, water vapor and heat in concrete can be obtained on the basis of mixtures theory (1, 2). It is assumed that the factors

* Referat opracowany na XIX Konferencję Naukowo-Techniczną „Kontra”

* The paper to be presented at the XIX “Kontra” Conference

teorii mieszanin (1, 2). Zakłada się, że czynnikami wpływającymi na szybkość transportu jonów chlorkowych w betonie, oprócz gradientu stężenia tych jonów w roztworze w porach betonu, jest zawartość wolnej wody w betonie oraz porów ciągłych i otwartych w matrycy cementowej. W modelu nie uwzględnia się adsorpcji jonów chlorowych na powierzchni ścianek porów oraz reakcji chlorków z glinianami wapnia. Równanie transportu masy jonów chlorkowych w betonie ma następującą postać:

$$\frac{d\rho_f}{dt} = \text{div}(D_c \text{grad} \rho_f) \quad [1]$$

gdzie $\rho_f = \rho_f(\mathbf{x}, t)$ – zawartość jonów chlorkowych w betonie, kg/m^3 , D_c – efektywny współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych, m^2/s .

Efektywny współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych D_c zależy od zawartości porów ciągłych, wilgotności betonu i temperatury. Opis zmian tych wielkości opisano zależnością zaproponowaną w pracach (3, 4, 5):

$$D_c = D_c(T, \varphi) = D_{c, \text{ref}} F_c(T) F_c(\varphi). \quad [2]$$

gdzie $T = T(\mathbf{x}, t)$ jest temperaturą, K , $j = j(\mathbf{x}, t)$ – wilgotnością względną powietrza w porach betonu, $D_{c, \text{ref}}$ – współczynnikiem dyfuzji w przypadku wilgotności względnej $\varphi = 100\%$ i temperatury $T_{\text{ref}} = 296 \text{ K}$, $F_c(T)$, $F_c(\varphi)$ – czynnikami korygującymi współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych. Parametry korygujące współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych można wyliczyć z wzorów:

$$F_c(T) = \exp\left(\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T}\right)\right) F_c(\varphi) = \left(1 + \frac{(1-\varphi)^4}{(1-\varphi_c)^4}\right)^{-1}, \quad [3]$$

gdzie U jest pozorną energią aktywacji procesu dyfuzji jonów chlorkowych, kJ/mol , R – stałą gazową, $\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, φ_c – stałą wyznaczaną eksperymentalnie, która dla betonu przyjmuje wartość równą $\varphi_c \approx 0,75$ (4, 6).

Do opisu sprzężonego transportu wody, pary wodnej i ciepła z uwzględnieniem przemiany fazowej woda – para wodna zastosowano model Künzla (7). Model ten został przyjęty w programie komputerowym WUFI¹, rozwiązującym równania metodą objętości skończonych – FVM. Model jest definiowany układem równań bilansu wody, pary wodnej i ciepła (7):

$$\rho_w \dot{w} + \text{div} \mathbf{J}_2 = \tilde{\rho}_2, \quad \rho c_3 + \text{div} \mathbf{j}_3 = \tilde{\rho}_3, \quad [4]$$

$$c_3 = \frac{\rho_3}{\rho}, \quad w = \frac{\rho_l}{\rho_w} = \frac{V_l}{V}$$

$$\rho c \dot{T} = -\text{div}(\mathbf{q}) - \tilde{\rho}_3 \tilde{L}, \quad [5]$$

gdzie $c_3 = c_3(\mathbf{x}, t)$ – zawartość masowa pary wodnej w betonie, kg/kg , $\mathbf{j}_3 = \mathbf{j}_3(\mathbf{x}, t)$ – dyfuzyjny strumień pary wodnej, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $\mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_2(\mathbf{x}, t)$ – strumień wody, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $\tilde{\rho}_2 = \tilde{\rho}_2(\mathbf{x}, t)$ – źródło masy wody, $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$, $\tilde{\rho}_3 = \tilde{\rho}_3(\mathbf{x}, t)$ – źródło masy pary wodnej, $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$,

¹ Program opracowany w Instytucie Fizyki Budowli Fraunhofera w Holz-kirhen

influencing the rate of chloride ions transport in concrete, except their concentration gradient in the concrete pore solution, the free water content and continuous as well as open pores content in the cement matrix are. The model does not include chloride ions adsorption on the pores surface and their reaction with calcium aluminates. The chloride ions transport equation in concrete is the Fick's first law:

$$\frac{d\rho_f}{dt} = \text{div}(D_c \text{grad} \rho_f) \quad [1]$$

where $\rho_f = \rho_f(\mathbf{x}, t)$ – chloride ions content in concrete, kg/m^3 , D_c – effective chloride ion transport diffusion coefficient, m^2/s .

The effective chloride ions diffusion coefficient D_c depends on continuous pores content, concrete humidity and temperature. The changes of these factors has been defined, according to the method proposed in papers (3, 4, 5)

$$D_c = D_c(T, \varphi) = D_{c, \text{ref}} F_c(T) F_c(\varphi). \quad [2]$$

where $T = T(\mathbf{x}, t)$ is temperature, K , $j = j(\mathbf{x}, t)$ – relative humidity of the air in concrete pores, $D_{c, \text{ref}}$ – diffusion coefficient in the relative humidity $j = 100\%$ and temperature $T_{\text{ref}} = 296 \text{ K}$, $F_c(T)$, $F_c(\varphi)$ – the factors influencing the chloride diffusion coefficient, which can be calculated from the following formulae:

$$F_c(T) = \exp\left(\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T}\right)\right) F_c(\varphi) = \left(1 + \frac{(1-\varphi)^4}{(1-\varphi_c)^4}\right)^{-1}, \quad [3]$$

where U is apparent activation energy of the chloride ion diffusion, kJ/mol , R – gas constant, $\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, φ_c – experimentally determined constant, that for concrete takes the value $\varphi_c \approx 0,75$ (4, 6).

For the description of coupled water, water vapor and heat transport, taking into account the water – water vapor phase transformation, the Künzel model has been applied (7). This model has been included in the computer program WUFI¹, solving the equations by using the finite volume method – FVM. This model is defined by mass balance equations of water, water vapor and heat (7):

$$\rho_w \dot{w} + \text{div} \mathbf{J}_2 = \tilde{\rho}_2, \quad \rho c_3 + \text{div} \mathbf{j}_3 = \tilde{\rho}_3, \quad [4]$$

$$c_3 = \frac{\rho_3}{\rho}, \quad w = \frac{\rho_l}{\rho_w} = \frac{V_l}{V}$$

$$\rho c \dot{T} = -\text{div}(\mathbf{q}) - \tilde{\rho}_3 \tilde{L}, \quad [5]$$

where $c_3 = c_3(\mathbf{x}, t)$ is mass content of water vapor in concrete, kg/kg , \mathbf{j}_3 – diffusion flux of water vapor, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $\mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_2(\mathbf{x}, t)$ – water flux, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $\tilde{\rho}_2 = \tilde{\rho}_2(\mathbf{x}, t)$ – mass source of water, $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$, $\tilde{\rho}_3 = \tilde{\rho}_3(\mathbf{x}, t)$ – mass source of water vapor, $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$, $w = w(\mathbf{x}, t)$ – volumetric content of water in concrete, m^3/m^3 , $\rho_w = \rho_w(\mathbf{x}, t)$ – density of water, kg/m^3 , $\rho_l = \rho_l(\mathbf{x}, t)$ – water content in concrete (the volume V filled with porous material), kg/m^3 , V_l – the

¹ The program work out in the Fraunhofer Institute of Building Physics

$w = w(\mathbf{x}, t)$ – zawartość objętościowa wody w betonie, m^3/m^3 , $r_w = \rho_w(\mathbf{x}, t)$ – gęstość właściwa wody, kg/m^3 , $\rho_i = \rho_i(\mathbf{x}, t)$ – zawartość wody w betonie (w obszarze wypełnionym materiałem porowatym o objętości V), kg/m^3 , V_i – objętość wody zawartej w porach betonu, m^3 . Sumując równania [4] i [5] uzyskano równanie bilansu masy wody i pary wodnej stosowane w systemie WUFI (równanie uwzględnia fakt, że w materiałach budowlanych zawartość pary wodnej jest dużo mniejsza od zawartości wody ciekłej)

$$\rho_w \dot{w} + \rho \dot{c}_3 + \text{div } \mathbf{J}_2 + \text{div } \mathbf{j}_3 = \tilde{\rho}_2 + \tilde{\rho}_3 = 0, \\ \rho_w \dot{w} + \rho \dot{c}_3 \cong \rho_w \dot{w}, \quad [6]$$

Strumienie w równaniach [4-6] wyrażono w formie zależności:

$$\mathbf{J}_2 = -\rho_w D_w \text{grad } w, \quad \mathbf{j}_3 = -\frac{\delta}{\mu} \text{grad } p, \quad \mathbf{q} = -\Lambda \text{grad } T, \quad [7]$$

gdzie $D_w = D_w(j, T)$ – efektywny współczynnik dyfuzji wody, m^2/s , δ – efektywny współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$, $\mu = \mu(w, t)$ – współczynnik oporu dyfuzyjnego betonu, $p = p(\mathbf{x}, t)$ – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, Pa, \tilde{L} – ciepło parowania, J/kg, c – ciepło właściwe betonu, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $\Lambda = \Lambda(w, t)$ – współczynnik przewodności cieplnej betonu, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, $\mathbf{q} = (\mathbf{x}, t)$ – strumień ciepła, W/m^2 , r – gęstość betonu, kg/m^3 .

Uzupełnieniem modelu są zależności empiryczne opisujące gęstość prądu korozyjnego i oporność elektryczną betonu. Gęstość prądu korozyjnego i_{kor} , przyjęto z prac (8, 9). Zależność ta została opracowana na podstawie licznych wyników elektrochemicznych pomiarów polaryzacyjnych korozji zbrojenia, prowadzonych przez pięć lat. Gęstość prądu korozyjnego i_{kor} , mA/cm^2 , była korelowana z temperaturą, opornością elektryczną betonu, zawartością jonów chlorkowych w betonie i czasem jego ekspozycji

$$i_{kor} = 0,92 \exp\left(8,37 + 0,618 h (1,69 \rho_{fs}) - \frac{3034}{T_s} - \frac{0,000105 R_{c, res} + 2,32 t^{-0,215}}{0,000105 R_{c, res} + 2,32 t^{-0,215}}\right), \quad [8]$$

gdzie ρ_{fs} – zawartość jonów chlorkowych w betonie na powierzchni pręta zbrojeniowego, kg/m^3 , T_s – temperatura pręta zbrojeniowego, K, $R_{c, res}$ – oporność elektryczna otuliny betonowej, Ω , t – czas, rok.

Występująca w równaniu [8] oporność elektryczna betonu również została wyznaczona doświadczalnie w zależności od wilgotności względnej powietrza w porach otuliny betonowej φ_s w punkcie znajdującym się przy powierzchni prętów zbrojeniowych (10):

$$R_{c, res} = 90,537 \varphi_s^{-7,2548} [1 + \exp(5 - 50(1 - \varphi_s))]. \quad [9]$$

3. Czas inicjacji korozji zbrojenia i gęstość prądu korozyjnego

Wpływ klimatu na czas inicjacji korozji zbrojenia i przebieg zmian gęstości prądu korozyjnego rozpatrywano na przykładzie fragmentu płyty żelbetowej poddanej wpływowi klimatycznym i działaniu jonów chlorkowych [rysunek 1].

volume of water in concrete pores, m^3 . Summing the equations [4] and [5] the equation of mass balance of water and water vapor used in the WUFI system has been obtained (the equation takes into consideration a very low water vapour content in the building materials, much lower than the evaporable water)

$$\rho_w \dot{w} + \rho \dot{c}_3 + \text{div } \mathbf{J}_2 + \text{div } \mathbf{j}_3 = \tilde{\rho}_2 + \tilde{\rho}_3 = 0, \\ \rho_w \dot{w} + \rho \dot{c}_3 \cong \rho_w \dot{w}, \quad [6]$$

Fluxes in equations [4-6] was defined using the relations

$$\mathbf{J}_2 = -\rho_w D_w \text{grad } w, \quad \mathbf{j}_3 = -\frac{\delta}{\mu} \text{grad } p, \quad \mathbf{q} = -\Lambda \text{grad } T, \quad [7]$$

where $D_w = D_w(j, T)$ – effective water diffusion coefficient, m^2/s , δ – effective diffusion coefficient of water vapor in the air, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$, $\mu = \mu(w, t)$ – coefficient of diffusion resistance of material, $p = p(\mathbf{x}, t)$ – partial pressure of water vapor, Pa, \tilde{L} – evaporation heat, J/kg, c – specific heat of concrete, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $\Lambda = \Lambda(w, t)$ – thermal conductivity coefficient of concrete, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\mathbf{q} = (\mathbf{x}, t)$ – heat flux, W/m^2 , r – density of concrete, kg/m^3 .

The completion of the model are the empirical equations describing the corrosion current density and concrete electric resistivity. The corrosion current density i_{kor} has been adopted from the papers (8, 9). The adopted formula has been establish on the basis of numerous results of the electrochemical measurements of the reinforcement corrosion, during five years. The corrosion current density i_{kor} , mA/cm^2 , has been correlated with temperature, concrete electric resistivity, the chloride ions content in concrete and its exposure time:

$$i_{kor} = 0,92 \exp\left(8,37 + 0,618 h (1,69 \rho_{fs}) - \frac{3034}{T_s} - \frac{0,000105 R_{c, res} + 2,32 t^{-0,215}}{0,000105 R_{c, res} + 2,32 t^{-0,215}}\right), \quad [8]$$

where ρ_{fs} – content of chloride ions in concrete on the rebar surface, kg/m^3 , T_s – temperature of the rebar, K, $R_{c, res}$ – concrete cover electrical resistance, Ω , t – time, year.

The electrical resistivity of concrete included in the equation [8] was determined experimentally, in relation to the air relative humidity in concrete pores, close to the rebar surface (10)

$$R_{c, res} = 90,537 \varphi_s^{-7,2548} [1 + \exp(5 - 50(1 - \varphi_s))]. \quad [9]$$

3. The initiation time of rebars corrosion and the corrosion current density

The influence of climate on the initiation time of reinforcement corrosion and the evolution of corrosion current density has been analyzed on the example of the piece of reinforced concrete plate, which was subjected to the influence of climate and chloride ions attack [Fig. 1].

The concrete cover thickness $c = 27$ and $c = 47$ mm and the constant chloride ions content on the element surface $c_{f,0} = 0.75\%$

Przyjęto grubość otuliny betonowej zbrojenia $c = 27$ i $c = 47$ mm oraz stałą zawartość chlorków na powierzchni elementu $c_{f,0} = 0,75\%$ masy cementu. Założono, że oddziałujące na element płyty warunki klimatyczne określone tak zwanym typowym rokiem meteorologicznym odpowiadają miejscowości Vancouver w Kanadzie. Wybór tej miejscowości wynikał z możliwości obliczeniowych programu WUFI – wersja 4, który zawierał dane meteorologiczne tego miasta, a także położenia, bowiem szerokość geograficzna $49^{\circ}13'N$ jest zbliżona do szerokości geograficznej Polski. Dane klimatyczne obejmujące zmiany napromieniowania słonecznego powierzchni i opady deszczu w funkcji czasu przedstawiono na rysunkach 2a i 2b. Zgodnie z danymi klimatycznymi promieniowanie słoneczne na górnej powierzchni elementu zmieniało się w granicach od 10 do 960 W/m^2 . Opady deszczu w okresie rocznym na powierzchni poziomą oscylowały w granicach od 0 do około $10,2 \text{ l/(m}^2\text{h)}$.

Do obliczeń ciepłno-wilgotnościowych przyjęto warunki początkowe wynoszące $T(t=0) = 20^{\circ}\text{C}$, oraz $j(t=0) = 0,9$. Przebiegi godzinowych zmian warunków klimatycznych określono w okresie od 1 stycznia do 31 grudnia. Przeprowadzając obliczenia komputerowe uzyskano wyniki opisujące zmiany wilgotności względnej powietrza w porach betonu j_s i temperatury T_s w punkcie znajdującym się na powierzchni pręta zbrojeniowego, w najmniejszej odległości od krawędzi elementu (rysunek 2b).

Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi zmian pól temperatury T_s – krzywa 1, wilgotności względnej j_s przy otulinie betonu o grubości 27 mm – krzywa 2 oraz przy otulinie o grubości 47 mm – krzywa 3, w okresie 3 lat. Wilgotność względna powietrza w porach betonu na powierzchni zbrojenia w przybliżeniu wynosiła około 95%, natomiast zmiany temperatury wahały się od -5°C do około $+25^{\circ}\text{C}$, przy średniej rocznej $+10,4^{\circ}\text{C}$.

W celu wyznaczenia czasu inicjacji korozji zbrojenia przeprowadzono obliczenia dyfuzji jonów chlorkowych z uwzględnieniem temperatury i wilgotności elementu betonowego, przyjmując parametry materiałowe zestawione w tabelicy 1.

Obliczenia z zastosowaniem równania [1] wykonano autorskim oprogramowaniem komputerowym, metodą elementów skończonych (MES). Zawartość jonów chlorkowych c_f , odniesiono do masy cementu zawartej w betonie:

$$c_f = \frac{m_C}{m_{cem}} = \frac{\rho_f}{\rho_{cem}}, \quad \rho_{cem} = \frac{m_{cem}}{V}, \quad [10]$$

of the cement mass has been established. It has been assumed that the climate conditions affecting the concrete plate element, defined as the typical meteorological year (TMY) correspond to Vancouver in Canada. The choice of this location resulted from the calculation possibilities of the program WUFI – version 4, included the meteorological data of this city and, secondly, its location – latitude $49^{\circ}13'N$, is close to the latitude of Poland. The climate data, containing surface solar radiation and rainfall in the function of time, are shown in Figs. 2a and 2b. According to the climate data the solar radiation on the top surface of the element was changing within the limits 10 to 960 W/m^2 . The rainfall on the horizontal surface during the year oscillated in the range from 0 to approximately $10.2 \text{ l/(m}^2\text{h)}$.

To the thermal and humidity calculation the initial conditions $T(t=0) = 20^{\circ}\text{C}$, and $j(t=0) = 0.9$ have been adopted. The hourly climate changes has been determined in the period from 1st January to 31st December. As a result of computer calculations the air relative humidity in concrete pores j_s and temperature changes T_s on the rebar surface at the point in the closest distance from the element edge have been obtained (Fig. 2b).

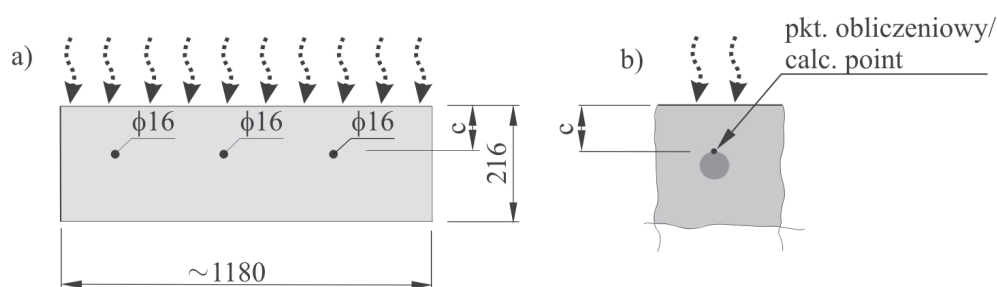
In Fig. 3 the diagram of the temperature field T_s – curve 1 and relative moisture changes j_s for a 27 mm thick cover – curve 2 and 47 mm thick cover – curve 3 in a time period of 3 years, has been shown. The air relative humidity changes in concrete pores was approximately 95%, the temperature changes in the range from -5°C to about $+25^{\circ}\text{C}$, while the average annual temperature was $+10.4^{\circ}\text{C}$.

In order to determine the initiation time of reinforcement corrosion, the chloride ions diffusion were calculated, taking into account the temperature and humidity of the element and the assumed material parameters shown in Table 1.

For the calculations according to equation [1] the author's computer program was applied, using the finite element method (FEM). The chloride ions content in concrete c_f , have been presented as the ratio to the cement mass content in concrete:

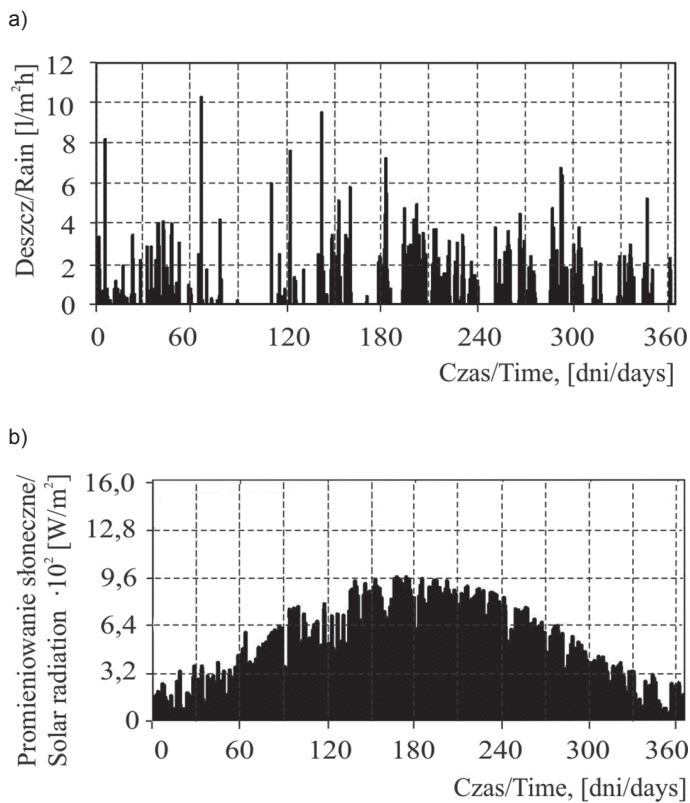
$$c_f = \frac{m_C}{m_{cem}} = \frac{\rho_f}{\rho_{cem}}, \quad \rho_{cem} = \frac{m_{cem}}{V}, \quad [10]$$

where m_{cl} is mass of chloride ions in concrete, kg, m_{cem} – cement mass in concrete, kg, r_{cem} – cement content in concrete, kg/m^3 .



Rys. 1. Badany fragment elementu żelbetowego: a) przekrój poprzeczny, b) usytuowanie punktu obliczeniowego

Fig. 1. Analyzed part of reinforced concrete element: a) cross section, b) calculation point location

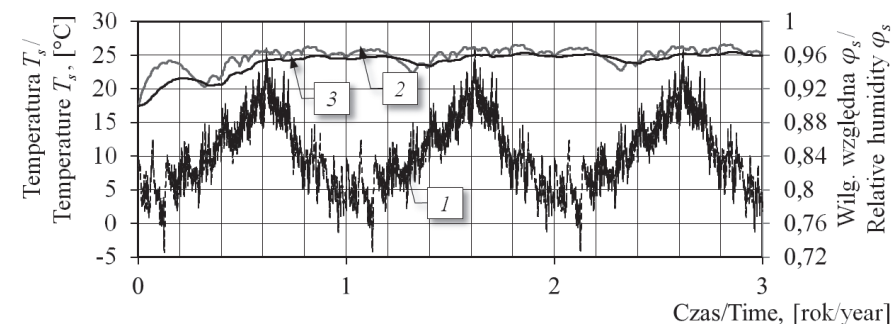


Rys. 2. Dane klimatyczne obejmujące typowy rok meteorologiczny w Vancouver: a) opady deszczu, b) promieniowanie słoneczne na powierzchni betonu

Fig. 2. Climatic data covering typical meteorological year in Vancouver: a) rainfall, b) solar radiation on the surface

gdzie m_{Cl} – masa jonów chlorkowych w betonie, kg, m_{cem} – masa cementu w betonie, kg, r_{cem} – zawartość cementu w betonie, kg/m³.

W celu oceny wpływu zmiennych warunków pogodowych na dynamikę przemian zachodzących w betonie wyniki zmiennych warunków ciepło-wilgotnościowych uzyskane na podstawie typowego roku meteorologicznego porównano z hipotetyczną sytuacją, która zachodzi przy stałej temperaturze i wilgotności względnej powietrza w porach betonu. Warunki stałe przyjęto w sposób arbitralny, tak aby uzyskać czas inicjacji procesu korozji



Rys. 3. Przebieg zmian temperatury T_s i wilgotności względnej powietrza w porach betonu j_s w najbardziej eksponowanym punkcie na powierzchni zbrojenia chronionego otuliną grubości $c = 27$ i $c = 47$ mm

Fig. 3. Diagram of changes of temperature T_s and relative air humidity in concrete pores j_s in the most exposed point on the rebar surface, protected through the cover thickness of $c = 27$ and $c = 47$ mm

In order to estimate the influence of variable weather conditions on the rate of transformations occurring in concrete, the results obtained in the case of variable thermal and humidity conditions, based on to the typical meteorological year, have been compared with the hypothetical situation that takes place at a constant temperature and air relative humidity in concrete pores. The constant conditions have been adopted arbitrarily to obtain a similar corrosion process initiation time to the one taking into account the typical meteorological year (TMY). For the calculations the temperature $T_s = 15^\circ\text{C}$ and the relative humidity $\varphi_s = 80\%$ in a point lying on the rebar surface were assumed. The computer obtained diagrams of changes of chloride ions concentration c_f at the calculation point (Fig. 1b) are presented in Fig. 4. As the criterion of the corrosion initiation, the achievement of threshold concentration at the calculation point $c_{f,kr} = 0,4\%$ of cement mass has been assumed (11). This value is the assessed time of corrosion initiation, that depends on various physic-chemical processes, occurring in the concrete cover (12).

The time of rebar corrosion initiation, assessed for the concrete cover thickness of $c = 27$ mm, taking into account the variable climate conditions was $t_{in} = 16,79$ years, however, in the constant conditions – $t_{in} = 17,62$ years. Similarly, the corrosion, in the case of cover thickness 47 mm was initiated after $t_{in} = 46,96$ years, in the case of changing climate conditions and after $t_{in} = 46,66$ years in the case of constant thermal and moisture conditions.

In the next step the changes of corrosion current density i_{cor} , in the first six years after reinforcement corrosion initiation, taking into account variable (TMY) and constant ($T_s = 15^\circ\text{C}$ and $\varphi_s = 80\%$) climate conditions, have been computer calculated. The results of the calculations of elements with the cover thickness of $c = 27$ mm are presented in Fig. 5a, while with the cover thickness of $c = 47$ mm, in Fig. 5b. Curves 1 present the corrosion current density changes i_{cor} , curve 2a and line 2b – relative chloride concentration c_{rel} , curve 3a and line 3b – relative temperature T_{rel} , whereas the curve 4a and line 4b – air relative humidity in concrete pores j_s . Additionally, the letter a indicates variable climate conditions (TMY), letter b – constant conditions.

The results of relative temperature T_{rel} and relative chloride ions concentration c_{rel} shown in Fig. 5 were defined by relationships:

$$T_{rel} = T/T_r \quad c_{rel} = c_f / c_r \quad [11]$$

where: T_r and c_r are reference temperature and concentration, arbitrarily chosen. In the calculations in dependence of concrete cover thickness the $T_r = 295\text{K}$ ($21,85^\circ\text{C}$) for $c = 27$ mm and the $T_r = 296,0\text{K}$ ($22,85^\circ\text{C}$) for $c = 47$ mm, and $c_r = 0.477\%$ were adopted.

To define the direct influence of air relative humidity in concrete pores j_s and temperature T_s on the development of reinforcement corrosion,

Tablica 1 / Table 1

PARAMETRY MATERIAŁOWE ZASTOSOWANE W ANALIZIE TRANSPORTU JONÓW CHLORKOWYCH, WODY, PARY WODNEJ I CIEPŁA

MATERIAL PARAMETERS IN THE TRANSPORT ANALYSIS OF CHLORIDES, WATER, WATER VAPOR AND HEAT

Współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych w temperaturze $T_{ref} = 23^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 100\%$ Chloride diffusion coefficient in the temperature $T_{ref} = 23^{\circ}\text{C}$ and relative humidity $\varphi = 100\%$	$D_c = 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Energia aktywacji dyfuzji jonów chlorkowych (4) / Chloride ions activation energy (4)	$U = 44,6 \text{ kJ/mol}$
Stała gazowa / Gas constant	$R = 8,314 \text{ kJ/molK}$
Stała φ_c wyznaczana eksperymentalnie / Experimentally determined constant φ_c	$\varphi_c = 0,75$
Stosunek wodno cementowy / Water cement ratio	$w/c = 0,5$
Porowatość betonu / Porosity of concrete	20%
Koncentracja jonów chlorkowych na brzegu elementu / Chloride concentration on the boundary	$c_{f,0} = 0,75 \% \text{ c.m.}$
Zawartość cementu / Cement content	350 kg/m^3

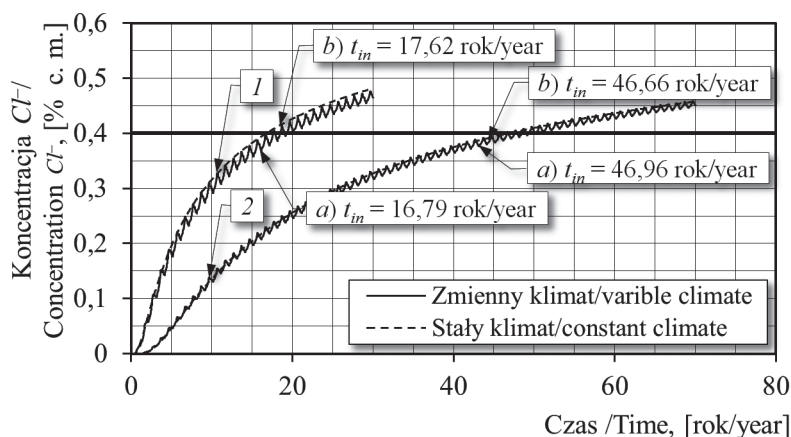
zbrojenia analogiczny do przypadku uwzględniającego typowy rok meteorologiczny (TRM). W obliczeniach przyjęto temperaturę $T_s = 15^{\circ}\text{C}$ oraz wilgotność względną powietrza w porach betonu otuliny $\varphi_s = 80\%$ w punkcie znajdującym się na powierzchni zbrojenia. Otrzymane komputerowo wykresy zmian zawartości jonów chlorkowych c_f w punkcie obliczeniowym (rysunek 1b) pokazano na rysunku 4. Jako kryterium inicjacji procesu korozji zbrojenia przyjęto osiągnięcie w punkcie obliczeniowym krytycznej koncentracji jonów chlorkowych wynoszącej $c_{f,kr} = 0,4\%$ masy cementu (11). Wartość ta jest oszacowaniem momentu inicjacji procesu korozji, który zależy od złożonych procesów fizyko-chemicznych zachodzących w otulinie betonowej (12).

Czas inicjacji korozji zbrojenia chronionego otuliną o grubości $c = 27 \text{ mm}$, wyznaczony z uwzględnieniem zmiennych warunków klimatycznych, wyniósł $t_{in} = 16,79$ lat, natomiast w stałych warunkach – $t_{in} = 17,62$ lat. Analogicznie, inicjacja korozji zbrojenia w przypadku otuliny o grubości 47 mm nastąpiła po upływie $t_{in} = 46,96$ lat, gdy zmiany klimatyczne zostały uwzględnione i po upływie $t_{in} = 46,66$ lat w stałych warunkach cieplno-wilgotnościowych.

W następnym etapie modelowania komputerowo obliczono zmiany gęstości prądu korozyjnego i_{kor} w pierwszych sześciu latach po zainicjowaniu korozji zbrojenia z uwzględnieniem zmiennych (TRM) oraz stałych ($T_s = 15^{\circ}\text{C}$ oraz $\varphi_s = 80\%$) warunków klimatycznych. Wyniki obliczeń elementów z otuliną o grubości $c = 27 \text{ mm}$ pokazano na rysunku 5a, natomiast elementów z otuliną o grubości $c = 47 \text{ mm}$ na rysunku 5b. Krzywe 1 obrazują zmiany gęstości prądu korozyjnego i_{kor} , krzywa 2a i linia 2b – względną zawartość chlorków c_{wzgl} , krzywa 3a i linia 3b – względną temperaturę T_{wzgl} , natomiast krzywa 4a i prosta 4b – wilgotność względną powietrza w porach betonu j_s . Litera a oznacza zmiennne warunki klimatyczne (TRM), a litera b – warunki stałe.

Zamieszczone na rysunku 5 wartości względne temperatury T_{wzgl} i zawartości jonów chlorkowych c_{wzgl} zostały określone zależnością:

$$T_{rel} = T/T_r \quad c_{rel} = c_f / c_r \quad [11]$$



Rys. 4. Przebieg zmian zawartości jonów chlorkowych w najbardziej eksponowanym punkcie na powierzchni pręta zbrojeniowego; warunki klimatyczne: a) zmienne, b) stałe; 1 – otulina betonowa grubości $c = 27 \text{ mm}$, 2 – otulina grubości $c = 47 \text{ mm}$

Fig. 4. Diagram of changes of chloride ions content in the most exposed point on the rebar surface; climate conditions: a) changing, b) constant; 1 – cover thickness $c = 27 \text{ mm}$, 2 – cover $c = 47 \text{ mm}$

the diagrams of corrosion density i_{kor} presented in Fig. 6, obtained for the variable climate conditions (TMY), have been compared with the corrosion density determined for constant chloride ions content $c_f = c_{f,kr} = 0,4\%$ of cement mass, selected temperature and relative humidity, shown in Table 2.

Assuming in comparative calculations, the air relative humidity in concrete pores on the rebar's surface equal to $j_s = 82\%$ corresponding to the average relative humidity according to the climate data for the typical meteorological year, the relative humidity $j_s = 50\%$ as reported in the paper (10) for which the significant limitation of corrosion current density rate was found and $j_s = 90\%$, causing the occurrence of the maximum of the corrosion density have been chosen. A similar approach as choose for the temperature assumption on the rebar surface. The average temperature $T_s = 10,4^{\circ}\text{C}$ of a typical meteorological year as well as $T_s = 1^{\circ}\text{C}$ and $T_s = 23^{\circ}\text{C}$, resulted in almost no corrosion and favoring process of reinforcement corrosion, has been assumed (10).

The results of calculations are shown in fig. 6. Two mutually running continuous lines indicate the changes in corrosion density taking

gdzie T_r i c_r są temperaturą i zawartością odniesienia o wartościach dobieranych w sposób arbitralny. W obliczeniach przyjęto w zależności od grubości otuliny betonowej $T_r = 295\text{K}$ ($21,85^\circ\text{C}$) w przypadku $c = 27\text{ mm}$ i $T_r = 296,0\text{ K}$ ($22,85^\circ\text{C}$) w przypadku $c = 47\text{ mm}$ oraz $c_r = 0,477\%$.

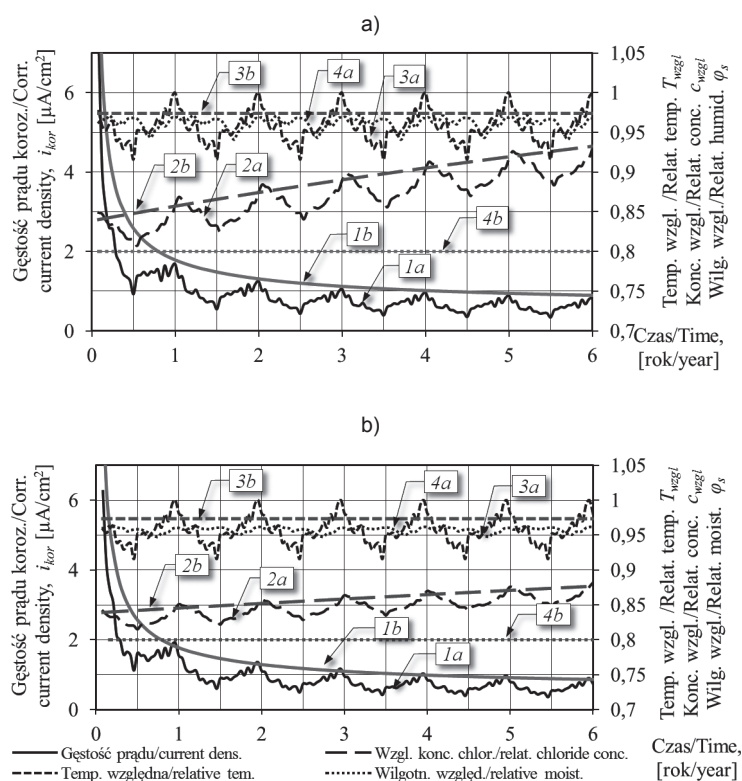
W celu określenia bezpośredniego wpływu wilgotności względnej powietrza w porach betonu na powierzchni zbrojenia ϕ_s i temperatury T_s na postęp korozji zbrojenia, przedstawione na rysunku 5 krzywe gęstości prądu korozyjnego i_{kor} , uzyskane w warunkach zmieniającego się klimatu (TRM) porównano z gęstością prądu korozyjnego wyznaczoną w przypadku stałej zawartości jonów chlorkowych $c_f = c_{f,kr} = 0,4\%$ masy cementu oraz wybranych wartościach temperatury i wilgotności względnej [tablica 2].

Przyjmując do obliczeń porównawczych wilgotność względną powietrza w porach betonu na powierzchni zbrojenia wybrano wartość $j_s = 82\%$ równą średniej wilgotności względnej powietrza zewnętrznego ustaloną na podstawie danych klimatycznych dla typowego roku meteorologicznego oraz zgodnie z pracą (10) wilgotność $j_s = 50\%$, w przypadku której odnotowano znaczne ograniczenie gęstości prądu korozyjnego i $j_s = 90\%$ powodującą wystąpienie maksymalnej wartości gęstości prądu korozyjnego. Podobnie postąpiono przy wyborze temperatury na powierzchni wkładki zbrojeniowej. Założono temperaturę $T_s = 10,4^\circ\text{C}$ równą średniej dla typowego roku meteorologicznego oraz $T_s = 1^\circ\text{C}$ i $T_s = 23^\circ\text{C}$ powodującą prawie zahamowanie korozji i sprzyjającą przebiegowi korozji zbrojenia (10). Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 6.

Dwie przebiegające niemal wspólnie linie ciągłe pokazują zmiany gęstości prądu korozyjnego wyznaczone z uwzględnieniem danych klimatycznych (krzywe a i b na rysunku 5), natomiast linie przerywane – gęstość prądu korozyjnego w analizowanych wariantach.

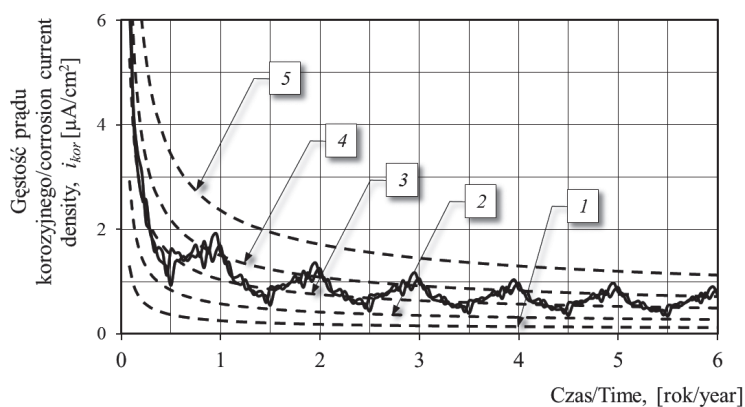
4. Podsumowanie

Przedstawiono analizy obliczeniowe wpływu czynników klimatycznych oraz działania chlorków na czas inicjacji procesu korozji zbrojenia, chronionego otuliną z matrycy cementowej oraz ewolucji gęstości prądu korozyjnego po rozpoczęciu procesów elektrochemicznych na powierzchni stalowych wkładek. Obliczenia wykonano stosując modele transportu masy i ciepła zdefiniowane w pracach (3-7). Dyfuzję chlorków wyznaczono autorskim programem komputerowym, natomiast sprzężony przepływ wody, pary wodnej i ciepła – profesjonalnym programem WUFI. Na podstawie wyznaczonych w betonie pół zawartości jonów chlorkowych, wody, pary wodnej i temperatury, stosując sformułowaną w pracach (8-9), empiryczną zależność modelującą gęstość prądu korozyjnego dokonano teoretycznej analizy rozwoju procesów korozyjnych zbrojenia w zmiennych warunkach klimatycznych, co stanowi oryginalny element pracy. Porównując przedstawione na



Rys. 5. Krzywe zmian gęstości prądu korozyjnego i_{kor} w zależności od czasu w przypadku względnej temperatury T_{wzgl} , względnej zawartości jonów chlorkowych c_{wzgl} , oraz wilgotności względnej powietrza w porach betonu j_s w elementach z otuliną betonową o grubości: a) $c = 27\text{ mm}$, b) $c = 47\text{ mm}$

Fig. 5. Diagram of changes in corrosion current density i_{cor} in the function of time with the reference to the relative temperature T_{rel} , relative chloride ions concentration c_{rel} , and also air relative humidity in concrete pores j_s in the elements with the thickness of concrete cover : a) $c = 27\text{ mm}$, b) $c = 47\text{ mm}$



Rys. 6. Przebieg zmian gęstości prądu korozyjnego w przypadku zmiennych warunków klimatycznych (TRM) i przyjętych według tablicy 2 wariantów obliczeń.

Fig. 6. Diagram of changes of corrosion density in the case of variable climate conditions (TMY) and accepted according to the Table 2 calculation variants

the climate data into account (Fig. 5a, b), however the dashed lines represent the corrosion density in the analyzed conditions.

4. Summary

The computational analysis of the influence of climate conditions and chlorides attack on the reinforcement corrosion initiation time

rysunkach 5 i 6 wyniki można zauważyć bardzo silną zależność gęstości prądu korozyjnego od zmieniających się warunków klimatycznych oraz, po zainicjowaniu korozji zbrojenia, brak związku między gęstością prądu korozyjnego i grubością otuliny. Zamieszczone na rysunku 5 przebiegi a i b zmian gęstości prądu korozyjnego uzyskane w zmiennych warunkach klimatycznych (TRM) i przy różnych grubościach otuliny są zbliżone, co można tłumaczyć osiągnięciem podobnych parametrów ciepłno-wilgotnościowych na powierzchni zbrojenia. Porównanie gęstości prądu korozyjnego wyznaczonego w zmiennych warunkach klimatycznych (TRM), z otrzymanymi po przyjęciu stałych wartości temperatury i wilgotności, wskazuje na duże rozbieżności, przekraczające nawet 100% [rysunek 6]. Prognozując na podstawie obliczeń rozwój procesów korozyjnych zbrojenia chronionego otuliną betonową, oprócz analizy zmian zawartości jonów chlorkowych, konieczne jest więc uwzględnienie warunków klimatycznych, określonych typowym rokiem meteorologicznym.

Podziękowania

Praca naukowa współfinansowana przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka – projekt „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju.

Literature / References

1. R. M. Bowen, Theory of Mixtures, in: Continuum Physics – Mixtures and EM Field Theories vol. III, eds. W. Camal Eringen, 1–127, Academic Press, New York 1976.
2. C. Truesdell, Rational thermodynamics, Springer Verlag, New York-Berlin-Heidelberg-Tokyo 1969.
3. A. Saetta, R. Scotta, R. Vitaliani, Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete, ACI Materials Journal, **90**, 5, 441–451 (1993).
4. B. Martin-Perez, Service life modeling of R. C. highway structures exposed to chlorides - PhD dissertation, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto 1998.
5. A. Saetta, R. Scotta, R. Vitaliani, Mechanical Behavior of Concrete under Physical-Chemical Attacks, Journal of Engineering Mechanics, **124**, 10, 1100–1109 (1998).
6. Z. Bažant, L. Najjar, Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Materials and Structures, **5**, 1, 3–20 (1972).
7. H. M. Künzel, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1995.
8. Y. Liu, 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.
9. Y. Liu, R. W. Weyers, Modelling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures, ACI Materials Journal, **95**, 6, 675–681 (1998).
10. I. Balafas, C. J. Burgoyne, Environmental effects on cover cracking due to corrosion, Cem. Concr. Res., **40**, 9, 1429–1440 (2010).
11. Z. Ściślewski, Ochrona konstrukcji żelbetowych, Arkady, Warszawa 1999.
12. W. Kurdowski, Chemia cementu i betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków 2010.

Tablica 2 / Table 2

PRZYJĘTE DO ANALIZY PORÓWNAWCZEJ PARAMETRY CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWE
ACCEPTED TO THE COMPARATIVE ANALYSIS THERMO-HUMIDITY PARAMETERS

Wariant obliczeń / Variant of calculations	1	2	3	4	5
Wilgotność względna / Relative humidity, j_s %	50	50	82	90	90
Temperatura / Temperature, T_s °C	1	23	10,4	1	23

which is protected by the cover of concrete and the evolution of corrosion density on the steel rebar surfaces after initiation of electrochemical processes, was presented. For the calculation the models of mass and heat transport defined in papers (3-7) were adopted. The diffusion of chloride ions was calculated using proprietary computer program. The coupled water, water vapor and heat transport have been calculated using professional program WUFI. Based on the obtained chloride ions, water and water vapor content in concrete as well as the temperature and using the empirical relationship modeling the current density formulated in papers (8-9), the theoretical analysis of corrosion development in variable climate conditions was calculated, which is the original element of this paper. The comparison of the results presented in Figs. 5 and 6 a significant dependence of corrosion current density of variable climate conditions after corrosion process initiation was shown. However, the absence of a relation between corrosion density and cover thickness was found. Presented on Figs. 5a and b the changes of corrosion current density obtained in variable climate conditions (TMY), and for different cover thickness, are close to each other which can be explained by the similar thermal and humidity parameters on the rebar surface. The comparison of corrosion densities determined in variable climatic conditions (TMY) with obtained, after assumption of constant temperature and moisture, point is showing the divergence exceeding even 100% [Fig. 6]. The computational forecast of the processes of reinforcement corrosion development, apart from the analysis of the content change of chloride ions, requires also taking into account the climate conditions, specified by the typical meteorological year.

Acknowledgements

This research work is co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund under the Innovative Economy Operational Program – the project on innovative means and effective methods of improving safety and durability of structures and transport infrastructure in a strategy of sustainable development.