

ANDRZEJ SERUGA, MARCIN MIDRO\*

## ANALIZA ZARYSOWANIA OTULINY BETONOWEJ W WYNIKU KOROZJI ZBROJENIA

### ANALYSIS OF CONCRETE COVER CRACKING DUE TO REINFORCEMENT CORROSION

#### Streszczenie

Artykuł jest poświęcony zagadnieniom związanym z korozją konstrukcji żelbetonowych. Opisano przyczyny i mechanizm korozji zbrojenia, wpływającej na zarysowanie konstrukcji oraz obniżenie nośności przekrojów. Na podstawie dostępnych badań eksperymentalnych i analiz numerycznych szczegółowo przedstawiono wpływ przyrostu objętości produktów korozji na powstanie rysy w betonie otaczającym zbrojenie i na dalszą propagację rysy. Analizowanymi wielkościami są: stosunek otulenia do średnicy zbrojenia, ilość cementu, wskaźnik wodno-cementowy, średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_{ctm}$ , współczynnik pełzania betonu oraz gęstość prądu korozji  $i_{cor}$ . Autorzy zaproponowali wzór do oszacowania czasu koniecznego do inicjacji rysy ( $t_p$ ) w wyniku wzrostu objętości produktów korozji.

*Słowa kluczowe: korozja, rdza, utrata nośności, zarysowanie, okres użytkowania konstrukcji*

#### Abstract

The paper is focused on the issue of corrosion of RC structures. Details of causes and corrosion mechanisms which diminishing load-capacities of RC constructions and structure cracking are discussed. On the basis of the experimental research and numerical analysis, the influence of volume increase of corrosion products near to reinforcement on RC structure's cracking (initiation and propagation cracking) it was determined. The researched variables are: cover/diameter ratio, proportions of cement, w/c tensile strength, creep coefficient and current density  $i_{cor}$ . Authors proposed the formula for estimation of cracking initial time ( $t_p$ ) as a result of the increase of reinforcement corrosion's products was created.

*Keywords: corrosion, rust, loss of load capacity, cracking, service life*

\* Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. PK, mgr inż. Marcin Midro, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Trwałość konstrukcji jest to zapewnienie przez określony czas stawianych wymagań w warunkach oddziaływania określonych czynników, bez wyraźnego obniżenia właściwości użytkowych lub wystąpienia nadmiernych kosztów. W czasie użytkowania konstrukcji żelbetonowych powyższe postulaty są zagrożone przez procesy degradacji, a w szczególności przez:

- dyfuzję agresywnych substancji powodujących korozję,
- reakcje chemiczne substancji pochodzących ze środowiska,
- proces cyklicznego zamarzania – odmrażania, który powoduje zarysowanie betonu.

Doświadczenia eksploatacyjne wskazują korozję stali zbrojeniowej jako jedną z najczęstszych przyczyn przedwczesnego niszczenia konstrukcji żelbetonowej [1, 2].

Zjawisko związane jest z depasycją warstwy ochronnej zbrojenia. Warstwa pasywna grubości 2–5 nm składa się z tlenków żelaza i tlenowodoru żelaza (getytu). Wnikające do betonu chlorki oraz proces karbonatyzacji prowadzą do obniżenia wskaźnika pH otuliny zbrojenia. W wyniku zobojętnienia otuliny następuje uszkodzenie warstwy pasywnej i można mówić o początku korozji.

## 2. Korozja zbrojenia

### 2.1. Opis procesu korozji

Korozja zbrojenia to proces o charakterze elektrochemicznym. Proces ten występuje w przypadku, gdy stal narażona na kontakt z roztworem elektrolitów (ciecz w porach betonu z uwodnionymi minerałami cementowymi). Zgodnie z ogólnymi założeniami teorii korozji metali, w procesie przebiegającym pomiędzy betonem a stalą zbrojeniową można wyróżnić katodę i anodę.

Różnica potencjałów między anodą i katodą powoduje korozję. Na anodzie postępuje reakcja utleniania metalicznego żelaza:



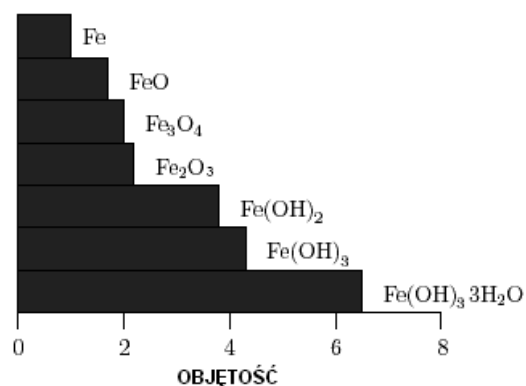
Uwolnione elektrony przechodzą poprzez zbrojenie w kierunku katody. Na katodzie zachodzi redukcja tlenu z przekształceniem go w obecności wody w jony  $\text{OH}^-$ :



Jony wodorotlenowe uwolnione w reakcji redukcji na katodzie wędrują pod wpływem pola elektrycznego i wchodzi w reakcje z jonami żelaza:



Od stężenia jonów tlenu w środowisku zależy możliwość powstania nowych produktów korozji. Transformacji z jednego produktu korozji w drugi produkt towarzyszy wzrost objętości. W zależności od stopnia utleniania i hydratacji objętość ta może wzrosnąć ponad sześciokrotnie [4].



Rys. 1. Objętość żelaza a objętość produktów jego korozji

Fig. 1. Relative volume of iron and its corrosion reaction products

Gromadzące się wokół zbrojenia produkty korozji wypełniają sieć porów. Gdy ilość produktów korozji przekroczy całkowitą objętość strefy porowatej, powstają naprężenia rozciągające. Dalszy przyrost ich objętości prowadzi do zarysowania otuliny betonowej po przekroczeniu wytrzymałości betonu na rozciąganie ( $f_{ct}$ ).

W wyniku korozji zbrojenia powstałe zarysowanie postępuje zarówno w płaszczyźnie prostopadłej do zbrojenia, jak i po długości pręta. Proces tworzenia się rys poprzecznych przebiega od zbrojenia w kierunku powierzchni konstrukcji i rysa jest widoczna dopiero, gdy osiągnie ona powierzchnię. Jednak rysy wewnętrzne są równie niebezpieczne, ponieważ ułatwiają kontakt agresywnych związków ze zbrojeniem, przyspieszając korozję. Rysy podłużne natomiast mogą być powodem odpajania się otuliny betonowej od zbrojenia.

Według [3], korozja zbrojenia, która stanowi główne źródło strat materiałowych, może doprowadzić do degradacji całej konstrukcji przez przekroczenie kryterium nośności (zmniejszenie nośności konstrukcji w wyniku zmiany przekroju zbrojenia w czasie) lub kryterium użyteczności (nadmierna szerokość rys). Niezmiernie ważna jest zatem znajomość przyczyn występowania mechanizmów korozji oraz określenie szybkości korozji, istotnego parametru do oszacowanie czasu koniecznego do zarysowania otuliny. Wyznaczenie czasu do zarysowania konstrukcji umożliwia oszacowanie okresu użytkowania konstrukcji oraz pozwala sformułować strategię użytkowania: częstotliwość inspekcji, częstotliwość i technologię napraw elementów.

## 2.2. Produkty korozji zbrojenia

Ilość produktów korozji obliczono na podstawie badań przeprowadzonych przez Y. Liu i R. E. Weyersa [4]. W czasie 5-letniego eksperymentu przeanalizowali oni zarysowanie płyt w wyniku korozji w środowisku chlorkowym.

Zaproponowano wzory na obliczenie ilości produktów korozji, których podstawę stanowią następujące założenia:

- podstawowym produktem korozji przebiegającej w sposób równomierny jest  $\text{Fe(OH)}_3$ , tzw. *czerwona rdza*. Stosunek masy stali skonsumowanej w procesie korozji do masy czerwonej rdzy na podstawie ich mas molowych wynosi:

$$\alpha = \frac{m_s}{m_r} = \frac{M_{\text{Fe}}}{M_{\text{Fe(OH)}_3}} = \frac{55,847 \text{ [g/mol]}}{106,841 \text{ [g/mol]}} \approx 0,523 \quad (4)$$

- strefa porowata na granicy beton–zbrojenie, której objętość zależy od powierzchni zbrojenia, w/c, stopnia hydratacji i rozmiaru kruszywa;
- wzrost produktów rdzy jest nieliniową funkcją czasu, ponieważ jony żelaza muszą dyfundować przez warstwę rdzy tworzącej się wokół pręta zbrojeniowego, zanim nastąpi dalsze utlenianie;
- naprężenia rozciągające, powstałe wskutek ekspansji rdzy, są główną przyczyną zarysowania otuliny wskutek korozji zbrojenia. Wpływ pozostałych efektów na zarysowanie (dynamiczne obciążenie, cykliczne zamarzanie – odmrażanie) nie jest rozpatrywany.

Przebieg wzrostu rdzy wokół zbrojenia podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie trwa swobodne rozprzestrzenianie się produktów korozji, a wyznaczenie ich ilości ( $Q_r$ ) związane jest z objętością strefy porowatej wokół zbrojenia.

Ilość rdzy potrzebna do wypełnienia strefy porowatej ( $Q_p$ ) opisano wzorem:

$$Q_p = \pi \rho_{rust} d_0 D \quad (5)$$

w którym:

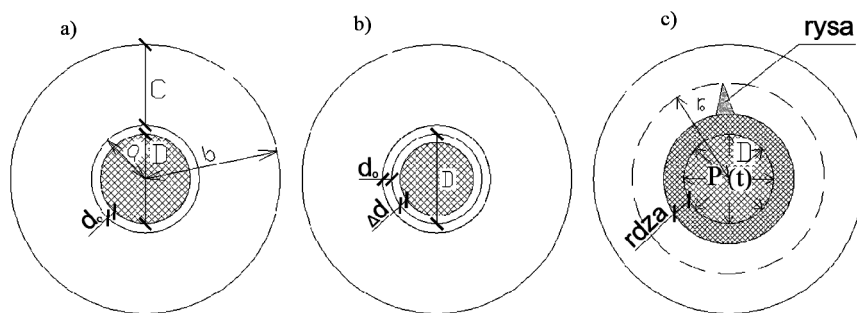
- $\rho_{rust}$  – gęstość produktów korozji, dla  $\text{Fe(OH)}_3$  wynosi  $3,32 \text{ g/cm}^3$ ;
- $d_0$  – głębokość strefy porowatej,  $12,5 \mu\text{m}$  według [4];
- $D$  – średnica zbrojenia.

Z chwilą gdy ilość produktów korozji przekroczy całkowitą objętość strefy porowatej, powstają naprężenia rozciągające. Naprężenia zwiększają się wraz ze wzrostem ilości rdzy. W momencie, gdy całkowita ilość rdzy ( $Q_r$ ) osiąga krytyczną wartość ( $Q_{crit}$ ), następuje przekroczenie wytrzymałości betonu na rozciąganie i rozpoczyna się drugi etap – zarysowanie betonu wskutek korozji. Krytyczna ilość rdzy potrzebna do powstania zarysowania otulenia zależy głównie od średniej wytrzymałości betonu na rozciąganie ( $f_{ctm}$ ), grubości otuliny, efektywnego modułu sprężystości betonu oraz właściwości strefy porowatej wg [4]:

$$Q_{crit} = \rho_{rust} \left( \pi \left[ \frac{C f_{ct}}{E_{c,eff}} \left( \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_c \right) + d_0 \right] D + \frac{Q_{st}}{\rho_{st}} \right) \quad (6)$$

gdzie:

- $C$  – grubość otuliny,
  - $\nu_c$  – współczynnik Poissona,
  - $Q_{st}$  – ilość skorodowanego zbrojenia, dla  $\text{Fe(OH)}_3$   $Q_{st} = 0,523 \cdot Q_{crit}$ ,
  - $\rho_{st}$  – gęstość stali,  $7,85 \text{ g/cm}^3$ ,
- $a = \frac{D + d_0}{2}$ ,  $b = C + \frac{D + d_0}{2}$  – współczynniki, zależne od grubości otuliny i średnicy zbrojenia.



Rys. 2. Schemat korozji wywołującej proces zarysowania

Fig. 2. Schema of corrosion-induced concrete cracking process

Przeprowadzone badania [3] potwierdzają wpływ ilości produktów korozji zbrojenia na zarysowanie elementów. Serie próbek żelbetowych zawierające 3%  $\text{CaCl}_2$  masy cementu poddano badaniom (test galwaniczny), w których wywoływano przyspieszoną korozję zbrojenia dla różnych wartości przepływającego prądu. Próbkę do badań różniły się między sobą: rodzajem i zawartością cementu, wskaźnikiem w/c, porowatością, głębokością otuliny betonowej, średnicą zbrojenia oraz warunkami dojrzewania. Wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe wynosiła pomiędzy 2,40–4,00 MPa.

Wnioski z badań prowadzą do stwierdzeń, że zarysowanie betonu następuje przy niewielkim zmniejszeniu przekroju zbrojenia (dla  $C/D < 2$  zmniejszenie promienia zbrojenia o 15–30  $\mu\text{m}$  wywołuje zarysowanie betonu), a szerokość rysy wzrasta powoli aż do wartości granicznej 0,3 mm, która w tym przypadku stanowi okres granicznego użytkowania konstrukcji. O pojawieniu się rysy decyduje porowatość, wytrzymałość betonu na rozciąganie, średnica zbrojenia oraz gęstość prądu korozji  $i_{cor}$ .

### 3. Obliczenie czasu, po którym nastąpi zarysowanie betonu

Przeanalizowanie wpływu korozji zbrojenia na konstrukcję żelbetową wymaga oszacowania czasu, po którym nastąpi zarysowanie w wyniku wzrostu produktów korozji. Całkowity czas do zarysowania betonu  $t_{cr}$  można podzielić na dwa etapy:

- okres inicjacji rysy  $t_p$  upływający od początku korodowania pręta do chwili, w której wokół zbrojenia naprężenia rozciągające przekroczą wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_{cm}$ ,
- okres propagacji rysy  $t_{pro}$  od jej powstania do chwili osiągnięcia powierzchni elementu.

Czas do zarysowania konstrukcji może być wyznaczany wprost jako  $t_{cr}$  lub określany etapami (wylczenie okresu inicjacji i propagacji rysy).

#### 3.1. Całkowity czas do zarysowania

Korzystając z formuły zamieszczonej w [4], całkowity czas do zarysowania betonu można obliczyć w oparciu o krytyczną ilość produktów korozji:

$$t_{cr} = \frac{Q_{crit}^2}{k_p} \quad (7)$$

gdzie:

$Q_{crit}$  – krytyczna ilość produktów korozji obliczona ze wzoru (6);  
 $k_p$  – współczynnik określający szybkość produkcji rdzy:

$$k_p = 0,105 \frac{\pi \cdot D}{\alpha} i_{cor} \quad (8)$$

Zakłada się, że gęstość prądu korozji  $i_{cor} > 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  odpowiada średniemu poziomowi korodowania, natomiast  $i_{cor} > 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  odpowiada wysokiemu poziomowi w środowisku agresywnym [3].

Poniżej zaproponowano alternatywną metodę wyznaczania czasu  $t_{cr}$  stanowiącą kompilację analitycznej formuły obliczeń czasu do inicjacji rysy i metod komputerowych opisujących propagację rysy.

### 3.2. Czas do inicjacji rysy

Czas konieczny do inicjacji rysy obliczono na podstawie formuły stworzonej przez autorów. Formuła obliczeń przedstawia związek między zarysowaniem a utratą promienia zbrojenia dla korozji równomiernej.

Wykorzystując zależność (4), wyznaczono graniczną masę rdzy wywołującą rysę:

$$m_r = \frac{1}{0,523} \cdot \rho_{st} \cdot \pi \cdot (R^2 - (R - \Delta d)^2) = \frac{1}{0,523} \cdot \rho_{st} \cdot \pi \cdot (2R \cdot \Delta d - (\Delta d)^2) \quad (9)$$

gdzie:

$\Delta d$  – zmiana przekroju średnicy pręta, równa  $23,2 \mu\text{m}/\text{rok}$  dla  $i_{cor} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;  
 $R$  – promień pręta zbrojeniowego.

Masę rdzy można również obliczyć, korzystając z Prawa Faraday'a:

$$m_r = 2J_r \cdot t_p \cdot \pi \cdot R \quad (10)$$

gdzie:

$J_r$  – szybkość korozji, dla produktu korozji  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  równa:

$$J_r = 5,536 \cdot 10^{-7} i_{cor} \quad (11)$$

Porównując masę rdzy ze wzorów (9) oraz (10), wyznaczono czas do inicjacji rysy  $t_p$ :

$$t_p = \frac{\rho_{st}}{0,523 J_r \cdot 2R} (2R \Delta d - (\Delta d)^2) \text{ [s]} \quad (12)$$

Po podstawieniu do powyższego wzoru zależności (11) i kolejnym przekształceniu (wprowadzenie lat w miejsce sekund) otrzymano:

$$t_p = \frac{859,6484}{i_{cor}} \left( \Delta d - \frac{\Delta d^2}{2R} \right) \text{ [lata]} \quad (13)$$

### 3.3. Czas propagacji rysy

Obecnie najdokładniejszy opis procesu propagacji rysy zapewniają metody komputerowe, wykorzystujące: MES, teorie mechaniki zniszczenia z modelami rysy fikcyjnej lub rys rozmytych. W artykule czas propagacji rysy nie został jednak oszacowany z wykorzystaniem powyższych metod. Stanowi on tylko różnicę między obliczonym wcześniej całkowitym czasem do zarysowania  $t_{cr}$  a czasem do inicjacji  $t_p$ .

### 4. Oszacowanie szerokości rysy na powierzchni betonu w wyniku korozji zbrojenia

Przedstawiony na rys. 2 betonowy walec z centralnie umieszczonym prętem zbrojeniom można traktować jako element grubościenny, co potwierdzają prace [6, 13]. Gdy korozja zbrojenia postępuje, grubość pierścienia produktów korozji  $d_s(t) = \Delta d + d_0$  można określić na podstawie [4]:

$$d_s(t) = \frac{Q_{rust}(t)}{\pi(D + 2d_0)} \left( \frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\alpha}{\rho_{st}} \right) \quad (14)$$

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik zależny od typu produktów korozji, dla  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  wynosi 0,523.

$Q_{rust}(t)$  – wzrost masy produktów korozji w czasie, który można określić według [4]:

$$Q_{rust}(t) = \left( 2 \int_0^t 0,105(1/\alpha)\pi \cdot D \cdot i_{cor}(t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Jak wcześniej wspomniano, pierścień produktów korozji powoduje powstanie dodatkowych naprężeń w betonie w miejscu styku ze zbrojeniem. Powstałe naprężenia mogą:

- nie spowodować zarysowania betonu,
- spowodować częściowe zarysowanie,
- spowodować całkowite zarysowanie otuliny

W początkowej fazie, gdy beton nie ulega zarysowaniu, można zastosować teorię sprężystości do określenia naprężeń głównych  $\sigma_r(t)$  i naprężeń stycznych  $\sigma_\theta(r)$  w jakimkolwiek punkcie rozpatrywanego betonowego walca [12]. Dla naprężeń głównych  $\sigma_r(r)$ , ciśnienie  $P$  na styku beton/zbrojenie opisano wzorem:

$$P(t) = -\sigma_r(a) = \frac{2E_{c,eff} \cdot d_s(t)}{(D + d_0) \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_c \right)} \quad (16)$$

gdzie:

$E_{c,eff}$  – efektywny moduł sprężystości,  
 $\nu_c$  – współczynnik Poissona.

Powstała rysa w betonie powiększa się w kierunku promienistym do chwili samowolnego zatrzymania się w punkcie  $r_0$ , po osiągnięciu stanu równowagi (punkt  $r_0$  określony między odległościami  $a$  i  $b$ ). Gdy  $r_0 < b$ , to rysa dzieli betonowy walec na dwie części: wewnętrzną

zarysowaną i zewnętrzną niezarysowaną, co pokazano na rys. 2c. Dla części zewnętrznej, niezarysowanej nadal ma zastosowanie teoria sprężystości. Główne przemieszczenia  $u(r)$  w tej części betonowego walca można określić z [12]:

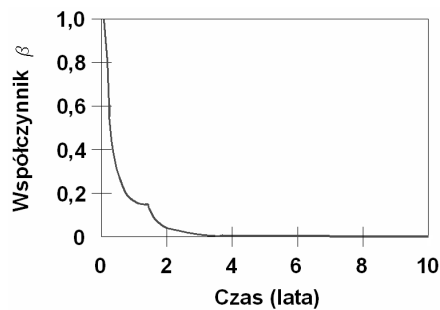
$$\frac{d^2u(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du(r)}{dr} - \frac{u(r)}{r^2} = 0 \quad (17)$$

Ze względu na symetrię nie są uwzględniane przemieszczenia styczne. Dla wewnętrznej zarysowanej części walca założono, że beton jest materiałem kruchym, a rysy są rozmyte i równomiernie rozłożone na jego obwodzie [6]. Ponadto założono istnienie resztkowej sztywności w zarysowanej części walca, która w przedziale  $[a, r_0]$  przyjmuje wartość  $\beta E_{c,eff}$ , gdzie  $\beta < 1$  jest współczynnikiem redukcji sztywności, zależnym od średniego odkształcenia stycznego:

$$\beta = \frac{f_{ct} \exp[-\gamma(\overline{\varepsilon_{\theta}} - \overline{\varepsilon_{\theta,c}})]}{E_{c,eff} \overline{\varepsilon_{\theta}}} \quad (18)$$

gdzie:

$\overline{\varepsilon_{\theta,c}}$  – średnie odkształcenie styczne w zarysowanym betonie.



Rys. 3. Współczynnik redukcji sztywności  $\beta$

Fig. 3. Tangential stiffness reduction factor  $\beta$

W wyniku zarysowania beton staje się materiałem anizotropowym. Odmienne właściwości zarysowanego betonu w zależności od kierunku zostały uwzględnione przez przyjęcie różnych wartości modułów sprężystości i współczynników Poissona:

$$\nu_2 E_{c,eff} = \nu_1 \cdot \beta \cdot E_{c,eff} \quad (19)$$

gdzie:

$\nu_1$  – współczynnik Poissona w kierunku promieniowym;

$\nu_2$  – współczynnik Poissona w kierunku stycznym.

Związek między naprężeniami i odkształceniami, uwzględniający anizotropię betonu i uśrednienie  $\nu_c = \sqrt{\nu_1 \cdot \nu_2}$  można zapisać w postaci:



$$\sigma_r(r) = \frac{E_{c,eff}}{1-\nu_c^2} (\varepsilon_r(r) + \nu_c \sqrt{\beta} \cdot \varepsilon_\theta(r)) \quad (20)$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{E_{c,eff}}{1-\nu_c^2} (\beta \cdot \varepsilon_\theta(r) + \nu_c \sqrt{\beta} \cdot \varepsilon_r(r)) \quad (21)$$

Powyższe równania naprężeń spełniają w stanie równowagi (gdy na betonowy walec nie działa dodatkowe obciążenie) następujące założenie:

$$\frac{\partial \sigma_r(r)}{\partial r} + \frac{\sigma_r(r) - \sigma_\theta(r)}{r} = 0 \quad (22)$$

Po podstawieniu do powyższej zależności wzoru (20), (21) i uwzględnieniu związków Cauchego:  $\varepsilon_r(r) = \frac{du(r)}{dr}$ ,  $\varepsilon_\theta(r) = \frac{u(r)}{r}$  otrzymano:

$$\frac{d^2 u(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du(r)}{dr} - \beta \frac{u(r)}{r^2} = 0 \quad (23)$$

Z równania (23) można wyznaczyć przemieszczenia w zarysowanym betonowym walcu, które zapisuje się w postaci:

$$u(r) = C_1(r_0) r^{\sqrt{\beta}} + C_2(r_0) r^{-\sqrt{\beta}} \quad (24)$$

gdzie:

$C_1(r_0), C_2(r_0)$  – współczynniki, zależne od  $r_0$ :

$$C_1(r_0) = \frac{2\sqrt{\beta}(1-\nu_c) \cdot r_0 d_s(t)}{\Delta} \quad (25)$$

$$C_2(r_0) = \frac{2\sqrt{\beta}(1+\nu_c) \cdot r_0 \cdot b^2 \cdot d_s(t)}{\Delta} \quad (26)$$

dla

$$\Delta = (1-\nu_c^2) \cdot (1-\sqrt{\beta}) \left[ \left( \frac{a}{r_0} \right)^{\sqrt{\beta}} \cdot b^2 + \left( \frac{r_0}{a} \right)^{\sqrt{\beta}} \cdot r_0^2 \right] \quad (27)$$

Uwzględniając związek Cauchego między odkształceniami a przemieszczeniami, równanie (24) podstawiono do (20) i (21), co powoduje, że  $r_0$  i  $\beta$  stanowią główne zmienne dla naprężeń. Gdy naprężenia główne w betonie osiągną w punkcie  $r_0$  wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_{ct}$ , następuje jego zarysowanie:

$$\frac{E_{c,eff}}{1-\nu_c^2} \left[ (1+\nu_c)C_1(r_0) + \frac{(1-\nu_c)C_2(r_0)}{r_0^2} \right] = f_{ct} \quad (28)$$

Zakładając dalszy postęp procesu, następuje penetracja rys do zewnętrznej warstwy otuliny betonowej, później pojawienie się rys na powierzchni dla  $r_0 = b$  i dalsze poszerzanie rys. Szerokość rys na powierzchni określono dla przypadku  $r = b$ :

$$w_c = 2\pi \cdot b \left[ \varepsilon_\theta(b) - \varepsilon_\theta^{e,m}(b) \right] \quad (29)$$

gdzie:

$\varepsilon_0^{e,m}(b)$  – maksymalne odkształcenia plastyczne równe według [12]:

$$\varepsilon_0^{e,m}(b) = \frac{\sigma_{\theta,m}(b) - \nu_c \sigma_r(b)}{E_{c,eff}} \quad (30)$$

gdzie:

$\sigma_{\theta,m}(b)$  – maksymalne naprężenia styczne.

Ponieważ  $\sigma_r(b) = 0$  i  $\sigma_{\theta,m}(b) = f_{ct}$  szerokość rys jest ostatecznie określona:

$$\begin{aligned} w_c &= 2\pi \cdot b \left[ C_1(b)b^{(\sqrt{\beta}-1)} + C_2(b)b^{(-\sqrt{\beta}-1)} - \frac{f_{ct}}{E_{c,eff}} \right] = \\ &= \frac{4\pi \cdot d_s(t)}{(1-\nu_c)(a/b)^{\sqrt{\beta}} + (1+\nu_c)(b/a)^{\sqrt{\beta}}} - \frac{2\pi \cdot b \cdot f_{ct}}{E_{c,eff}} \end{aligned} \quad (31)$$

W powyższym wzorze wartość  $w_c$  definiuje maksymalną szerokość rysy na powierzchni otuliny. Kluczowymi zmiennymi w równaniu (31) są: grubość produktów korozji  $d_s(t)$  i współczynnik redukcji sztywności  $\beta$ .

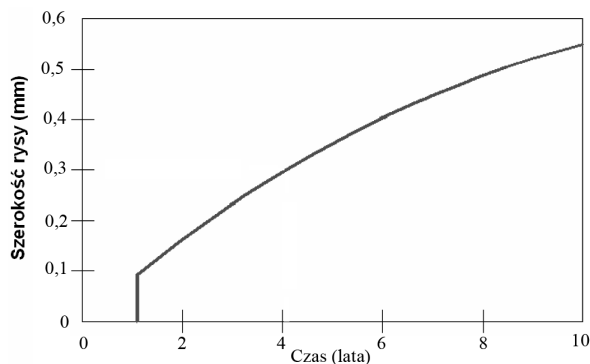
Zmienna  $d_s(t)$  określona wzorem (14) zależy przede wszystkim od gęstości prądu korozji  $i_{cor}$ . Współczynnik  $\beta$  opisany zależnością (18) zależy jest od geometrii elementu i właściwości betonu. Rzeczą oczywistą jest również wzrost szerokości rys w czasie  $t$  przy coraz większej akumulacji produktów korozji zbrojenia.

Dla sprawdzenia poprawności wyznaczonej szerokości rysy  $w_c$  (31), przyjęto do obliczeń podstawowe wartości z już przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analiz numerycznych naukowców [3, 4, 14], a wyniki porównano z uzyskanymi przez nich rezultatami. Podstawowe wielkości wykorzystane do określenia rysy  $w_c$  podano w tabeli 1, natomiast na podstawie przyjętych danych przedstawiono zmienną w czasie szerokość rysy, której przebieg ilustruje rys. 4.

Tabela 1

**Podstawowe wielkości wykorzystane do określenia szerokości rysy  $w_c$**

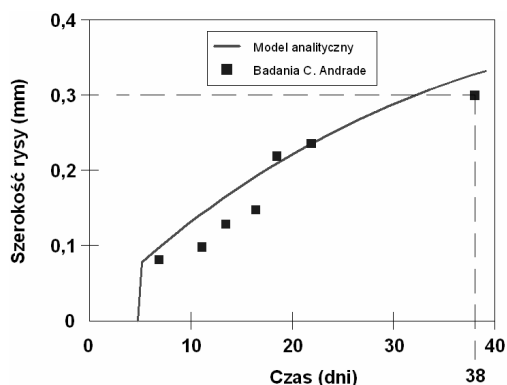
Wielkość	Wartość	Źródło
$D$	12 mm	[14]
$C$	31 mm	[14]
$d_0$	12,5 $\mu\text{m}$	[4]
$\alpha$	0,523	[4]
$\nu_c$	0,18	[4]
$\rho_{st}$	7850 kg/m <sup>3</sup>	[4]
$\rho_{rust}$	3600 kg/m <sup>3</sup>	[4]
$E_{c,eff}$	18,82 GPa	[14]
$f_{ctm}$	5,73 MPa	[14]
$i_{cor}$	$0,368\ln(t) + 1,1305 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	[14]



Rys. 4. Szerokość rysy wywołanej korozją zbrojenia jako funkcja czasu

Fig. 4. Corrosion-induced crack width as function of time

Dodatkowo, przeprowadzono szczegółowe porównanie wyznaczonej w sposób analityczny szerokości rysy  $w_c$  (31) z wynikami badań laboratoryjnych [3]. W przeprowadzonych przez C. Andrade badaniach szerokości rys, żelbetowe elementy o wymiarach  $15 \times 15 \times 38$  cm poddano działaniu wysokiej gęstości prądu korozji ( $i_{cor}$  przekraczało nawet  $100 \mu A/cm^2$ ), co spowodowało przyspieszoną korozję zbrojenia. Korozja wywołała pojawienie się rys o szerokości 0,3 mm już po 38 dniach od rozpoczęcia eksperymentu. Szerokości rys zmierzone w czasie eksperymentu pokazano na rys. 5. Używając tych samych wartości zmiennych, tj. grubość otuliny, szybkość korozji, wytrzymałość betonu, wyznaczono szerokość rysy, a wyniki również zostały naniesione.



Rys. 5. Porównanie szerokości rysy w czasie

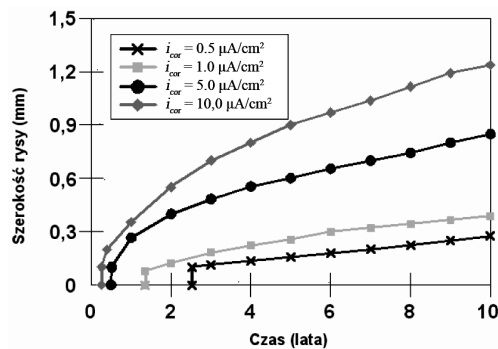
Fig. 5. Verification of crack width over time

Jak można zauważyć, wyniki analityczne są zbliżone do rezultatów badań eksperymentalnych. Należy stwierdzić, iż prawie wszystkie pomierzone szerokości rys są mniejsze niż szerokości obliczone ze wzoru (31), co można tłumaczyć wyznaczeniem przez model maksymalnej wartości szerokości rysy.

Jedną z istotnych zalet modelu jest możliwość sprawdzenia stopnia wpływu poszczególnych czynników na wzrost szerokości rysy. Do zmiennych mających największe znaczenie dla wzrostu szerokości rysy należą:

- szybkość korozji reprezentowana przez  $i_{cor}$ ,
- geometria elementów żelbetowych reprezentowana przez stosunek otuliny do średnicy zbrojenia  $C/D$ ,
- właściwości betonu – wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_{ct}$  i współczynnik pełzania.

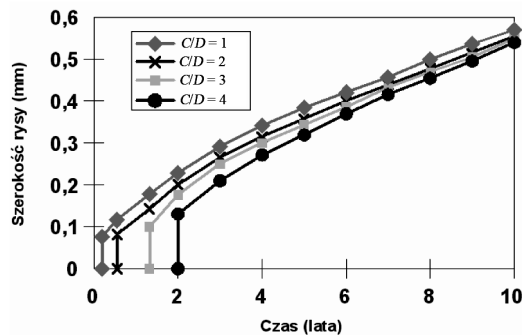
Według [5] gęstość prądu korozji jest najistotniejszym czynnikiem wpływającym na wzrost zarysowania. Jak pokazano na rys. 6, dla przyjętych wartości gęstości prądu korozji można założyć liniowy wzrost szerokości rysy w czasie po zarysowaniu betonu.



Rys. 6. Wpływ  $i_{cor}$  na szerokość rysy

Fig. 6. Influence of  $i_{cor}$  on crack width

Kolejnym czynnikiem odgrywającym znaczącą rolę jest stosunek  $C/D$ . Rysunek 7 wskazuje, iż zmiana  $C/D$  wpływa bardziej na czas konieczny do powierzchniowego zarysowania niż na szerokość rysy.



Rys. 7. Wpływ  $C/D$  na szerokość rysy

Fig. 7. Influence of  $C/D$  on crack width

Można dodatkowo zaobserwować, że proporcjonalne zwiększenie wartości  $C/D$  opóźnia chwilę pojawienia się rys na powierzchni elementu.

Pozostałe czynniki, tj. większa wytrzymałość betonu na rozciąganie i wartość współczynnika pełzania, opóźniają czas do pojawienia się rysy, jednak ich wpływ na szerokość powstałej rysy jest już niewielki.

### 5. Praktyczne zastosowanie formuł obliczeń

W tabeli 2 zaprezentowano wartości całkowitego czasu poprzedzającego zarysowanie oraz czasu do inicjacji rysy w zależności od grubości otuliny i wartości gęstości prądu korozji. Podstawę analizy stanowią trzy płyty żelbetowe o zawartości chlorków 5,69 kg/m<sup>3</sup> (płyty nr 1, 2) oraz 7,2 kg/m<sup>3</sup> (nr 3), zarysowane podczas eksperymentalnych badań [4]. Zaobserwowany czas do zarysowania porównano z czasem do zarysowania wyliczonym ze wzoru (7) w oparciu o krytyczną ilość produktów korozji. W tabeli dodatkowo oznaczono wartości czasu do inicjacji rysy wokół zbrojenia, obliczone na podstawie formuły zaproponowanej przez autorów artykułu.

Tabela 2

Całkowity czas do zarysowania a czas do inicjacji rysy

Płyty żelbetowe: 118×118×21,6 [cm] Nr	Średnica zbrojenia <i>D</i> [mm]	Głębokość otuliny <i>C</i> [mm]	$i_{cor}$ [μA/cm <sup>2</sup> ]	Czas do inicjacji rysy $t_p$ [lata]	Czas zarysowania $t_{cr}$ [lata]	
					Obliczony	Zaobserwowany
1	16	50	2,41	0,83	1,53	1,84
2	16	76	1,79	1,11	3,34	3,54
3	16	25	3,75	0,53	0,56	0,72

### 6. Wnioski

Proces korozji zbrojenia należy uwzględnić w analizie trwałości konstrukcji. Z jednej strony korozja powoduje redukcję przekroju prętów, z drugiej powstałe produkty korozji o większej objętości niż stal wywołują zarysowanie otuliny. Czas konieczny do inicjacji rysy wokół zbrojenia stanowi pierwszy etap zarysowania konstrukcji i zależy od typu produktów korozji, ilości skorodowanego zbrojenia, gęstości prądu korozji, właściwości betonu (m.in. porowatości, wytrzymałości na rozciąganie) oraz średnicy zbrojenia. Czas propagacji rysy zależy od grubości otulenia i szybkości korozji.

Czas zarysowania otuliny można traktować jako liniową funkcję zmiany promienia pręta zbrojeniowego, gdzie zmniejszenie promienia o 15–30 μm powoduje powstanie rysy o szerokości ok. 0,05 mm.

W artykule przedstawiono dodatkowo model analitycznego wyznaczenia szerokości rysy powstałej wskutek korozji zbrojenia, a otrzymane wyniki porównano z rezultatami badań eksperymentalnych. Model jest przede wszystkim zależny od następujących czynników: szybkość korozji, stosunek  $C/D$ , wytrzymałości betonu na rozciąganie i współczynnika pełzania. Po przeprowadzonej analizie wpływu poszczególnych czynników na wzrost zarysowania uznano szybkość korozji reprezentowaną przez gęstość prądu korozji  $i_{cor}$  jako najistotniejszą wielkość.

Posługując się zaprezentowanym modelem, można przewidzieć z odpowiednią dokładnością szerokość rysy, a ponadto model ten może stanowić pomocne narzędzie dla inżynierów, podejmujących decyzje w sprawie remontów skorodowanych elementów konstrukcji.

Zaprezentowany model obliczeniowy skonstruowano na podstawie wyników uzyskanych z przyspieszonych badań laboratoryjnych. Wskazane jest zweryfikowanie ww. modelu na obiektach w skali naturalnej użytkowanych w warunkach wieloletniej eksploatacji, podanych działaniu czynników agresywnych dozowanych stopniowo w kolejnych latach.

#### Literatura

- [1] Wieczorek G., *Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2002.
- [2] Zybyra A., *Metody zapewnienia trwałości budowli na przykładzie budownictwa betonowego*, [w:] *Problemy naukowo-badawcze budownictwa*, Praca zbiorowa, Tom 4: *Zrównoważony rozwój w budownictwie*, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2008, 235-252.
- [3] Alonso C., Andrade C., Rodriguez J., Diez J.M., *Factors Controlling Cracking of Concrete Affected by Reinforcement Corrosion*, *Materials and Structures*, Nr 31, 1998, 435-441.
- [4] Liu Y., Weyers R.E., *Modeling the Time-to-Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures*, *ACI Materials Journal*, Nr 95(6), 1998, 675-681.
- [5] Li C.Q., Melchers R.E., Zheng J.J., *Analytical Model for Corrosion-Induced Crack Width in Reinforced Concrete Structures*, *ACI Structural Journal*, Nr 103(4), 2006, 479-487.
- [6] Pantazopoulou S.J., Papoulia K.D., *Modeling Cover-Cracking due to Reinforcement Corrosion in RC Structures*, *Journal of Engineering Mechanics*, IV 2001, 342-351.
- [7] Andrade C., Alonso C., Molina F.J., *Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part I-Experimental test*, *Materials and Structures*, Nr 26, 1993, 453-464.
- [8] Fagerlund G., *Trwałość konstrukcji betonowych*, Arkady, Warszawa 1997.
- [9] Czarnecki L., *Beton według Normy PN-EN 206-1 – komentarz*, Polski Cement, Kraków 2004.
- [10] Neville A.M., *Właściwości betonu*, Polski Cement, wyd. 4, Kraków 2000.
- [11] Ścisławski Z., *Trwałość konstrukcji żelbetowych*, Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 1995.
- [12] Timoshenko S., Goodier J.N., *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill Book, New York 1970.
- [13] Bażant Z.P., *Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures- Theory*, *Journal of Structural Division, ASCE*, Nr 105 (ST6), 1979, 1137-1153.
- [14] Li C.Q., *Life Cycle Modeling of Corrosion Affected Concrete Structures – Propagation*, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Nr 129(6), 2003, 753-761.
- [15] Zybyra A., *Zabezpieczenie konstrukcji żelbetowych metodami elektrochemicznymi*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [16] *Advances in the mechanics of inhomogeneous media*, Charter 11, ed. C. Woźniak et. all., University of Zielona Góra, 2010.