

# Numeryczna analiza degradacji konstrukcji komina żelbetowego pod wpływem korozji siarczanowej



prof. dr hab. inż.  
**PIOTR KONDERLA**  
Politechnika Wroclawska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
ORCID: 0000-0001-7498-8435



prof. dr hab. inż.  
**RYSZARD KUTYŁOWSKI**  
Politechnika Wroclawska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
ORCID: 0000-0001-8497-4184

Celem badań niniejszej pracy była weryfikacja autorskiej adaptacji modelu korozji siarczanowej, w szczególności oszacowania zakresu parametrów tego modelu dla rzeczywistych konstrukcji, na których autorzy prowadzili badania *in situ*.

## Wstęp

Niniejsza praca jest kontynuacją badań opublikowanych w artykule [1], związanych z modelowaniem korozji siarczanowej w kominach przemysłowych. Dokonano pewnego uszczegółowienia elementów modelu, wy-specyfikowania wiodących parametrów modelu tak, aby można je było oszacować na podstawie wykonanych badań obiektu rzeczywistego. Celem badań była weryfikacja modelu matematycznego polegająca na sprawdzeniu, czy na podstawie analiz odwrotnych można dobrać parametry modelu opisującego proces dyfuzji siarczanowej w rzeczywistym obiekcie i uzyskać wynik tego procesu zbliżony do stanu rzeczywistego.

Obiektem badań *in situ* był jednoprowadowy komin znajdujący się w zakładach przemysłu petrochemicznego, wybudowany na początku lat 70. Komin ma 200 m wysokości, grubość ścianki trzonu komina przy podstawie wynosi 0,60 m, a przy wierzchołku 0,15 m. Trzon komina jest wykonany z betonu  $R_w=200$ , co odpowiada aktualnej klasie betonu C16/20.

## Matematyczne modelowanie procesu dyfuzji

Proces dyfuzji jonów siarki oraz skutków, jakie ta dyfuzja wywołuje w materiale, jest bardzo złożonym zagadnieniem. W pracy [1] sformułowano opis tego procesu, bazując na matematycznych modelach zaczerpniętych z publikacji naukowych [2]. W przywołanej pracy wykazano, że za pomocą kilku sprzężonych ze sobą modeli można racjonalnie opisywać proces dyfuzji, który odbywał się w kontrolowanych laboratoryjnie warunkach.

W niniejszej pracy model ten starano się zaimplementować do opisu dyfuzji w obiektach rzeczywistych, w których poziom nie-

pełności parametrów mających wpływ na proces jest nieporównywalnie większy niż w laboratorium. Dalej omówiono poszczególne elementy modelu w kontekście jego implementacji w zagadnieniach technicznych, takich jak żelbetowe kominy przemysłowe narażone na korozję siarczanową.

Zakłada się, że żelbetowy trzon kominowy jest poddany od środka działaniom agresywnych spalin zawierających jony siarki o zadanej intensywności. Dla uproszczenia analizy przyjmuje się, że z uwagi na geometrię, własności mechaniczne betonu oraz warunki obciążenia zagadnienie jest jednowymiarowe.

Dyfuzja jonów siarki opisana jest znanym równaniem dyfuzji z członem reakcyjnym

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D_{\text{eff}}(\omega) \Delta c(x,t) + R(x,c,c_e) \quad (1)$$

gdzie  $c(x,t)$  jest stężeniem jonów siarki w molach na  $m^3$ ;  $D_{\text{eff}}$  jest efektywnym współczynnikiem dyfuzji zależnym od początko-

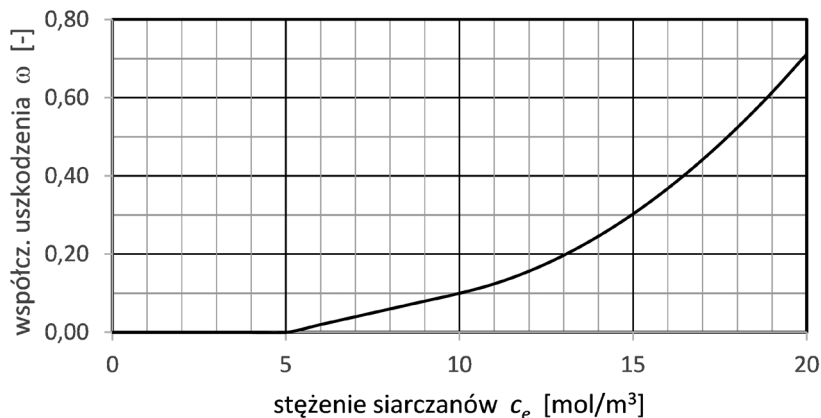
wego współczynnika  $D_0$ , porowatości  $p$  oraz stopnia uszkodzenia materiału  $\omega(x,t)$ ;  $R$  jest członem reakcyjnym.

W trakcie dyfuzji jony siarki wchodzą w reakcję z jednym ze składników spoiwa, trójgli-nianem wapnia C3A, tworząc ettringit. Prędkość, z jaką zmienia się stężenie ettringitu  $c_e(x,t)$ , opisuje wyrażenie

$$\frac{dc_e(x,t)}{dt} = kcc_a \quad (2)$$

gdzie  $c_a(x,t)$  w molach na  $m^3$  jest stężeniem C3A w betonie, natomiast  $k$  jest stałą reakcji.

Oszacowanie stałej reakcji  $k$  jest trudne nawet w warunkach laboratoryjnych. Wyznaczenie stałej  $k$  w warunkach rzeczywistych nie jest praktycznie możliwe, można jedynie dokonać pewnych szacunków, bazując na wartościach otrzymanych w badaniach laboratoryjnych i korzystając z analiz odwrotnych. Ponieważ stała  $k$  w dużym stopniu zależy od wielu parametrów fizykochemicznych i mechanicznych materiału, to trudno zało-



Rys. 1. Funkcja  $\omega(c_e)$  stosowana w symulacjach numerycznych

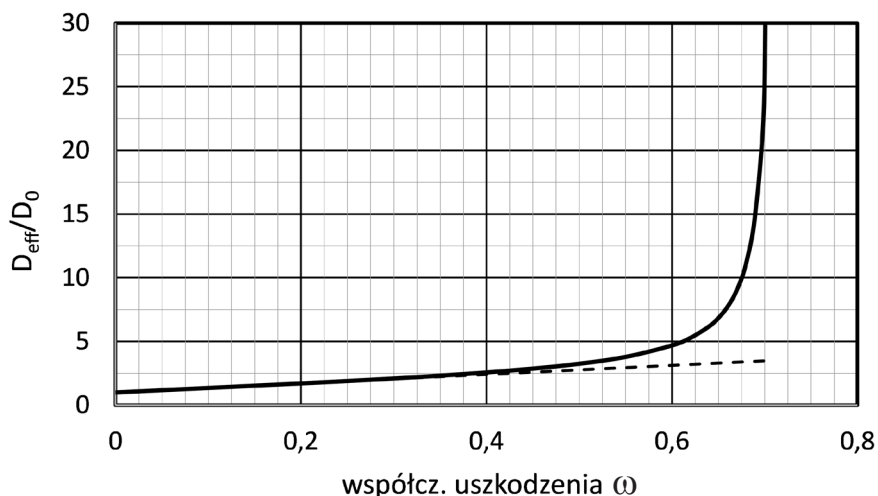
Wyniki wskazują, że zwiększenie dokładności odwzorowania procesów rzeczywistych będzie wymagało uwzględnienia w modelu wpływu temperatury na parametry modelu.

żyć, że przez cały okres procesu stała  $k$  ma jednakową wartość, co pośrednio potwierdziły przeprowadzone analizy numeryczne. W przeprowadzonych symulacjach numerycznych przyjmowano, że współcz. reakcji początkowo ma wartości  $k_0$  i zmniejsza się wraz ze wzrostem stężenia ettringitu. Uzyskany w badaniach *in situ* rozkład siarczanów na grubości trzonu komina wskazuje, że stała reakcji przy wysokim poziomie stężenia siarczanów musi być wielokrotnie niższa od wartości początkowej.

Tworzenie się ettringitu zmniejsza aktualne stężenie jonów siarki  $c_{(x,t)}$  oraz stężenie  $ca$ , które w chwili początkowej przyjmuje się jako stałe w obszarze i równe  $c_a^0$ . Prędkość zmiany stężenia  $c_{(x,t)}$  w trakcie procesu jest ujęta w składniku równania R, który zapisuje się w postaci

$$R(x, c, c_e) = -3kc(c_a^0 - c_e) \quad (3)$$

Krystalizacja ettringitu jest reakcją ekspansywną, w której objętość cząsteczki ettringitu jest zwykle wielokrotnie większa niż objętość składników, z których ona powstaje, co wywołuje w materiale wewnętrzne ciśnienie, które prowadzi do powstawania mikrorys i w konsekwencji uszkodzeń materiału.



Rys. 2. Funkcja  $D_{eff}(\omega)$  stosowana w symulacjach numerycznych

W dalszej analizie przyjęto izotropowy model uszkodzenia materiału, w którym miarą gęstości mikrorys jest współczynnik uszkodzenia  $\omega$ . Przyjmując założenie, że ettringit w głównej mierze jest odpowiedzialny za powstanie mikrorys i w konsekwencji uszkodzenie materiału, niezbędne było powiązanie miary uszkodzenia  $\omega$  ze stężeniem ettringitu  $c_e$ . Na podstawie dostępnych danych literaturowych [2, 3] przyjęto zależność, której wykres jest pokazany na rys. 1. Stężenie ettringitu na poziomie 2% w stosunku do masy spoiwa uznaje się jeszcze za dopuszczalne, poziom 6% za poziom krytyczny dla betonu. Z kolei z rozważań teoretycznych metodą perkolacji wartość  $\omega = 0,71$  uznaje się za poziom krytyczny.

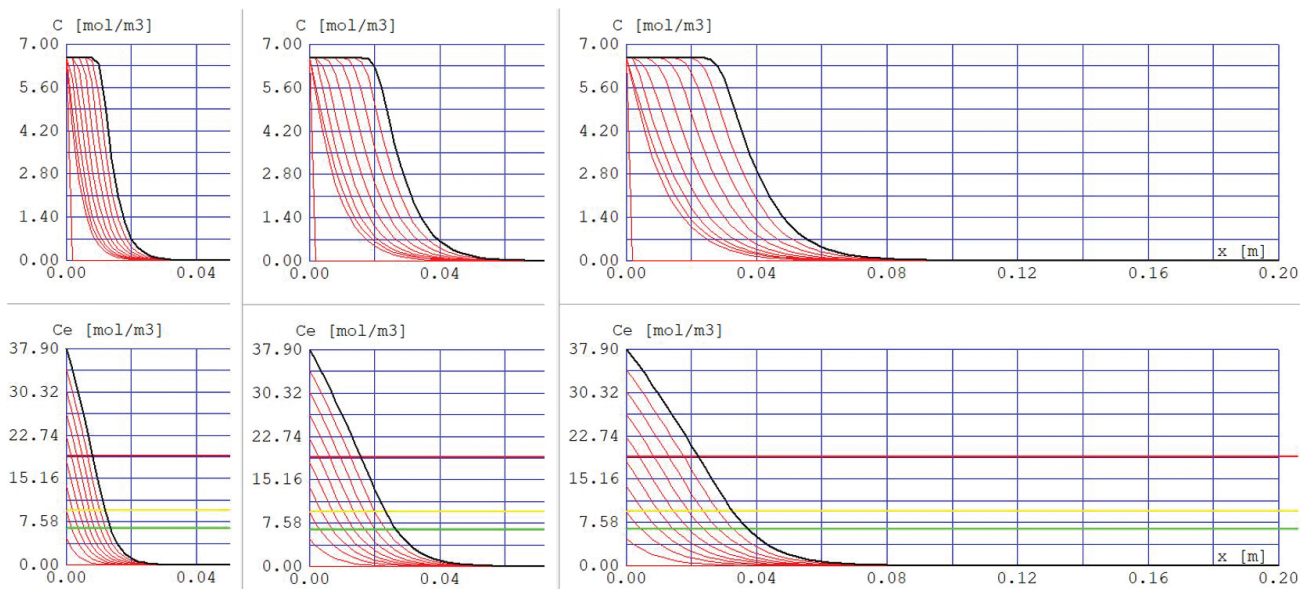
Efektywny współczynnik dyfuzji  $D_{eff}$  jest podstawowym parametrem równania (1) mającym wpływ na przebieg dyfuzji. Przyjmuje się, że dla materiału bez uszkodzeń współcz.

dyfuzji ma wartość stałą równą  $D_0$  i można go wyznaczyć w warunkach laboratoryjnych. Wykazano, że w kontrolowanych warunkach początkowy współcz. dyfuzji jest funkcją porowatości kapilarnej  $\phi$  i współcz. dyfuzji w wodzie  $D_w$  zgodnie z zależnością [2,4]

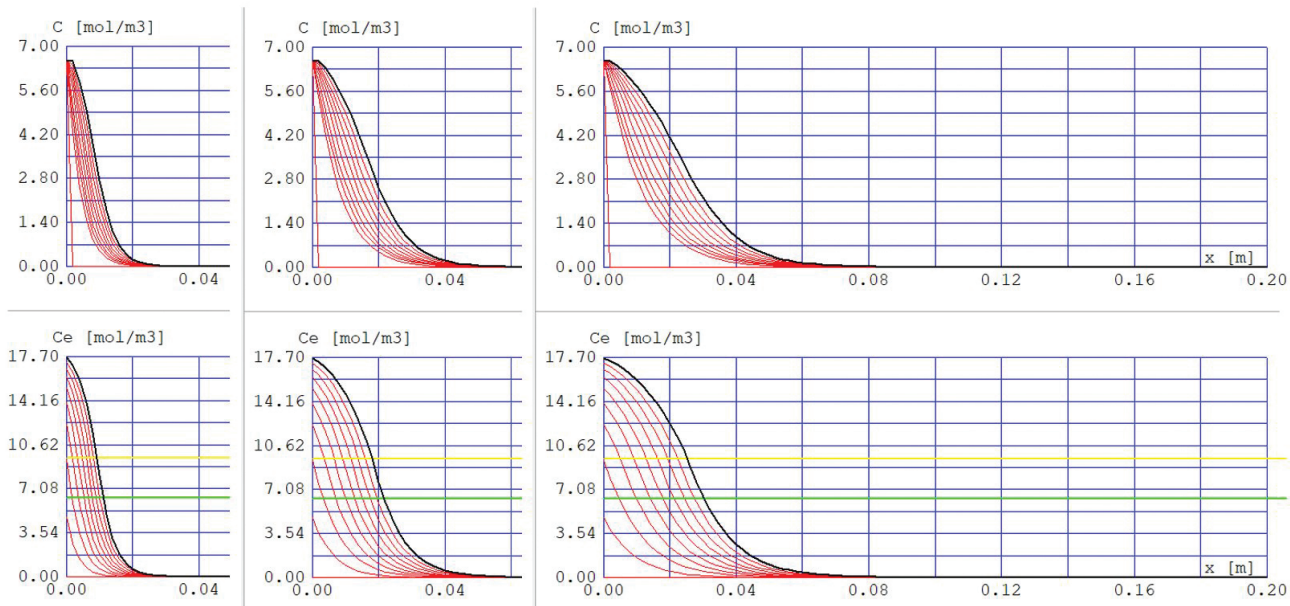
$$D_0 = D(\phi) = (0.001 + 0.07\phi^2)D_w \quad (4)$$

Dla betonu analizowanego komina porowatość kapilarna była oznaczona na poziomie 16,2% (dla współcz. hydratacji cementu  $\alpha = 0,9$  i współcz. wodno-cementowego  $w/c = 0,5$ ),  $D_w = 1.58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{rok}$ , stąd zgodnie z (4) mamy  $D_0 = 4.48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{rok}$ .

Generalnie współcz. dyfuzji  $D_0$  w betonach zmienia się w szerokim zakresie. Jak wykazano w [5], zaprawy i betony specjalne o bardzo małej przepuszczalności stosowane w budownictwie podziemnym mają współczynnik  $D_0$  w zakresie od  $3.15 \cdot 10^{-6}$ ÷



Rys. 3. Wyniki analizy procesu dla  $D_0 = 0,71 | 2,84 | 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{rok}$  i  $k_0 = 0.001 \text{ m}^3/\text{mol}/\text{rok}$



Rys. 4. Wyniki analizy procesu dla  $D_0 = 0,71 | 2,84 | 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{rok}$  i  $k_0 = 0.001 \text{ m}^3/\text{mol}/\text{rok}$

$\div 3.15 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{rok}$ . Z dostępnych danych literaturowych szacuje się, że współcz. dyfuzji betonów konstrukcyjnych mieści się w przedziale  $D_0 (4.5 \cdot 10^{-6} \div 80.0 \cdot 10^{-6}) \text{ m}^2/\text{rok}$

Uszkodzenia materiału wpływają na zmianę wszystkich parametrów fizykomechanicznych betonu. W zakresie występowania mikrorys przyjmuje się liniową zależność pomiędzy współcz.  $D_{\text{eff}}$  a współcz. uszkodzenia  $\omega$ . Przy większych wartościach  $\omega$  występuje zjawisko perkolacji i w efekcie akceptowaną zależnością zmiany efektywnego współcz. dyfuzji  $D_{\text{eff}}$  jest zależność nieliniowa (5) zaproponowana w pracy [6]; w formie graficznej zależność pokazana jest na rys. 2.

$$D_{\text{eff}}(\omega) = D_0 \left(1 + \frac{32}{9} \omega\right) + D_p(\omega). \quad (5)$$

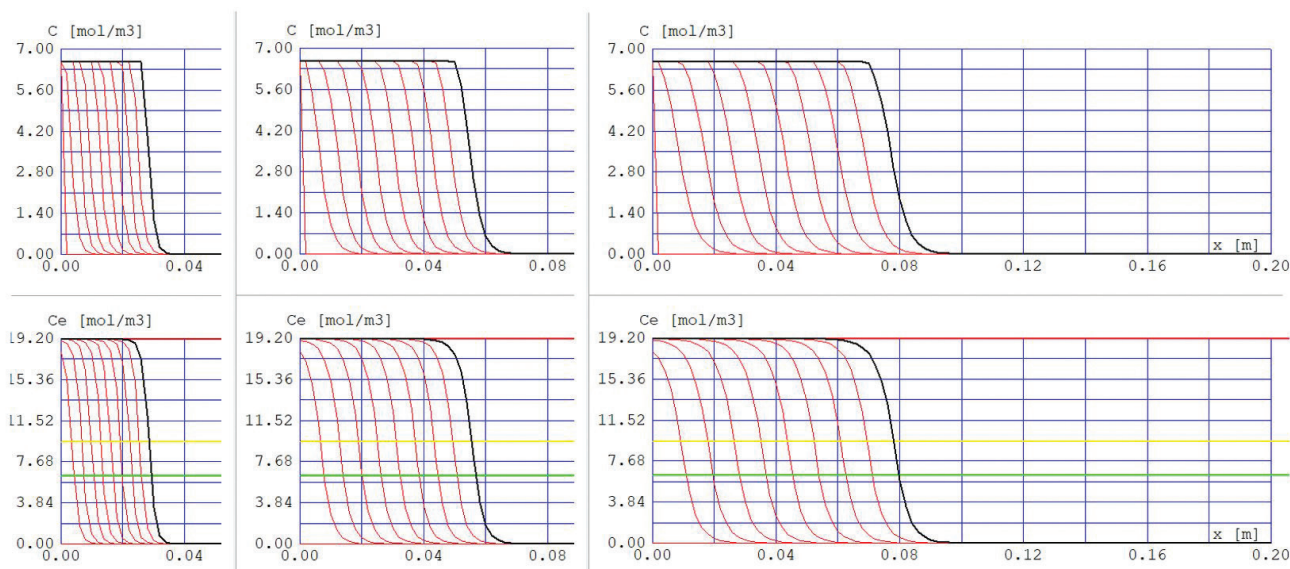
### Opis stanu trzonu komina i wyniki badań doświadczalnych stopnia korozji siarczanowej

Z dostępnych danych wynika, że już w 2009 roku komin był w stanie znacznego zużycia technicznego. Stwierdzono wtedy zarówno wiele błędów wykonawczych, jak i bardzo wysoki poziom degradacji, a także nieefektywność wykonanych wcześniej prac remontowych. Przede wszystkim zaś zwrócono uwagę na wysoki poziom zawartości siarczanów w betonie trzonu komina występujące na całej grubości trzonu (od 2,5% do 6,5% masy spoiwa). Wskazano, że jest to najważniejszy czynnik destrukcyjny betonu.

W roku 2014 wykazano bardzo wysoki poziom siarczanów w warstwach zewnętrznej

Objektem badań *in situ* był jednoprzewodowy komin znajdujący się w zakładach przemysłu petrochemicznego, wybudowany na początku lat 70.

i wewnętrznej trzonu komina, wyższy niż w roku 2009 (od 3,0% do 8,0% masy spoiwa). W roku 2019 opracowano dwie autorskie ekspertyzy. W ich ramach łącznie z trzonu komina pobrano 26 odwiertów rdzeniowych (4 z wysokości 60 i 80 m, a pozostałe z wysokości powyżej 150 m). Odwierty zostały poddane szerokim badaniom (wytrzymałościowym i fizykochemicznym). Z odwiertów przygotowano próbki do badań chemicz-



Rys. 5. Wyniki analizy procesu dla  $D_0 = 0,71 | 2,84 | 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{rok}$  i  $k_0 = 0.01 \text{ m}^3/\text{mol}/\text{rok}$



nych. Program badawczy obejmował badania zawartości siarczanów na całej długości pobranych odwiertów rdzeniowych. Przygotowano łącznie ponad 90 próbek, starając się zbadać w sposób reprezentatywny zarówno warstwy przypowierzchniowe, jak i znajdujące się głębiej, licząc od powierzchni zewnętrznej oraz od powierzchni wewnętrznej komina. Z przeprowadzonych badań wyniknęły następujące wnioski:

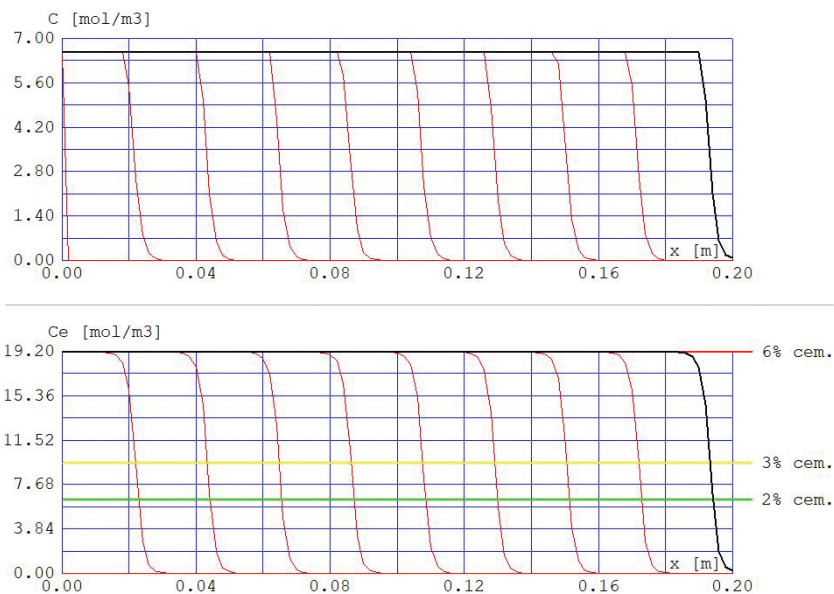
- zawartość siarczanów we wszystkich badanych próbkach była bardzo wysoka i w znaczącej większości przypadków przekraczała poziom 3% masy spoiwa, a nawet dochodziła do bądź przekraczała 6% masy spoiwa;
- stwierdzono, iż zawartość siarczanów jest lokalnie zróżnicowana, w bardziej zdegradowanych obszarach jest wyższa;
- zawartość siarczanów wyznaczona po grubości trzonu jest także zróżnicowana (niekiedy obserwowano wyższą zawartość siarczanów we wnętrzu trzonu niż w jego warstwach zewnętrznych);
- komin został wykonany z betonu o niskiej wytrzymałości na ściskanie, a jak wykazano w [7] na podstawie badania stanu wielu kominów, klasa betonu ma zasadnicze znaczenie dla rozkładu zawartości siarczanów po grubości trzonu, gdyż betony o wyższej wytrzymałości na ściskanie (powyżej poziomu 25 MPa) podlegają głównie przypowierzchniowej degradacji na skutek przypowierzchniowej penetracji siarczanów, a betony o niższej wytrzymałości (jak w naszym przypadku) ulegają równomiernej degradacji siarczanowej na całej grubości trzonu.

### Oszacowanie parametrów procesu dyfuzji siarczanowej

Analizowany proces jest nieliniowy. Punktem wyjścia oszacowania parametrów procesu są dane wyjściowe adaptowane z badań głównie laboratoryjnych oraz dane pochodzące z badań *in situ*. Głównym celem analiz numerycznych jest pokazanie, na ile prezentowany model matematyczny procesu dyfuzji jest w stanie opisać rzeczywistość zstana na obiekcie. Aby odpowiedzieć na to pytanie, wykonano kilka symulacji numerycznych, przyjmując parametry procesu z określonego zakresu.

Symulacje numeryczne wykonano dla trzonu komina o grubości 0,20 m. 1 m<sup>3</sup> betonu zawiera 400 kg cementu, w tym 10% C3A. Stężenie jonów SO<sub>4</sub> na brzegu x=0 wynosi c<sub>0</sub>(t)=6,56 mol/m<sup>3</sup>; na brzegu x=0,20 dc/dx=0; czas analizy 45 lat.

**Analiza\_1:** Analizowano proces dyfuzji dla kilku charakterystycznych wartości początkowego współcz. dyfuzji D<sub>0</sub>. Efek-



Rys. 6. Wyniki analizy procesu dla D<sub>0</sub> = 5,67 \* 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/rok i k<sub>0</sub> = 0.06 m<sup>3</sup>/mol/rok

tywny współcz. dyfuzji przyjęto w postaci D<sub>eff</sub>(ω) = D<sub>0</sub>(1 +  $\frac{32}{9}\omega$ ), pomijając składnik perkolacyjny, oraz współcz. reakcji przyjęto jako stałą wartość k<sub>eff</sub> ≡ k<sub>0</sub> = 0.001 m<sup>3</sup>/mol/rok.

Wyniki Analizy\_1 w postaci rozkładów w odstępach 5-letnich stężeń c<sub>(x,t)</sub> i c<sub>e(x,t)</sub> przedstawiono na rys. 3. W kontekście badań *in situ* symulacje numeryczne Analizy\_1 wykazują: (a) za mały zakres penetracji SO<sub>4</sub> na grubości trzonu, (b) zbyt wysoki poziom ettringitu w strefie brzegowej, (c) nierównomierny rozkład siarczanów.

**Analiza\_2:** Powtórzono symulacje jak w Analiza\_1, uwzględniając człon perkolacyjny oraz zmienną wartość stałej reakcji dla dwóch wartości k<sub>0</sub> = 0.001|0.010 m<sup>3</sup>/mol/rok. Wyniki analizy pokazano na rys. 4 i 5. Porównując wyniki symulacji numerycznych z wynikami badań *in situ*, zauważa się jakościową zbieżność wyników. Zastrzeżenia budzi prędkość dyfuzji. O prędkości czoła „fali dyfuzji” przy ustalonej wartości D<sub>0</sub> decyduje głównie parametr k<sub>eff</sub>.

**Analiza\_3:** Przyjęto D<sub>0</sub> = 5,67 \* 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/rok i skoncentrowano się na oszacowaniu parametru k<sub>eff</sub>, dla której symulacja procesu doprowadzi do pojawienia się siarczanów w całym obszarze.

Metodą przeszukiwania ustalono, że poszukiwany efekt otrzymuje się dla k<sub>0</sub> ≥ 0.006 m<sup>3</sup>/mol/rok.

### Wnioski

Celem symulacji numerycznych (SN) była weryfikacja matematycznego modelu dyfuzji oraz oszacowanie parametrów modelu dla których SN dawałoby jakościowo wyniki zgodne z badaniami poziomu siarczanów w kominie.

Generalnie dwa parametry decydują o wynikach SN: współcz. dyfuzji D<sub>eff</sub> i stała reakcji k<sub>eff</sub> z początkowymi wartościami odpowiednio D<sub>0</sub> i k<sub>0</sub>.

Wyniki SN wskazują, że średnie wartości współcz. dyfuzji D<sub>0</sub> i stałej reakcji k<sub>0</sub> podawane w literaturze są za małe, aby symulowany proces był jakościowo zgodny z wynikami badań na obiekcie. Aby uzyskać jakościową zgodność wyników SN ze stanem rzeczywistym na obiekcie, trzeba było: (a) przyjąć górne wartości D<sub>0</sub> i k<sub>0</sub> podawane w literaturze, (b) założyć, że efektywne wartości tych parametrów wyraźnie maleją wraz ze wzrostem uszkodzenia materiału. O ile w przypadku D<sub>eff</sub> jest to teoretycznie akceptowane, to w przypadku k<sub>eff</sub> nie ma jednoznacznej argumentacji.

Weryfikacja modelu matematycznego, która była celem pracy, została wykonana na bazie badań pojedynczego komina. Ocena merytoryczna modelu nie jest w pełni satysfakcjonująca. Brak pełnej korelacji SN z wynikami badań na obiekcie można również tłumaczyć ograniczeniami modelu polegającymi na pominięciu w modelowaniu istotnych czynników mających wpływ na proces. Takim czynnikiem na pewno jest pole temperatury, którego gradient jest wyjątkowo wysoki w kominach przemysłowych. To, w jakim stopniu gradient pola temperatury może zmieniać obraz procesu dyfuzji, wymaga oddzielnych badań.

### Literatura

- Konderla P., Kutylowski R., Patrański K. (2020). Modelowanie procesu korozji siarczanowej w kominie żelbetowym. „Builder”, nr 4, s. 34–37.
- Basista M., Węglewski W. (2008). Micromechanical modelling of sulphate corrosion in concrete: influence of ettringite forming reaction. „Theoret. Appl. Mech.”, Vol.35, nr 1–3, s. 29–52.
- Krajcinovic, D. (1996). Damage Mechanics, Elsevier, Amsterdam.
- Marchand, J., Samson, E., Malrais, Y., Beaudoin, J.J. (2002). Theoretical analysis of the effect of weak sodium sulfate solutions on the durability of concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 24, s. 317–329.
- Szeląg H., Kurdowski W. (2009). Cementy Specjalne dla Budownictwa Podziemnego. „Górnictwo i Geoinżynieria”, Zeszyt 3/1, s. 373–382.
- Krajcinovic, D., Basista, M., Mallick, K., Sumarac, D. (1992). Chemo-micromechanics of brittle solids. „Journal of the Mechanics and Physics of Solids”, Vol. 40, s. 965–990.

[7] Kańka, St. (2012). Materiałowe i eksploatacyjne uwarunkowania trwałości żelbetowych kominów przemysłowych, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Łądowej.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.8018

#### PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Konderla Piotr, Kutyłowski Ryszard, 2022, Numeryczna analiza degradacji konstrukcji kominu żelbetowego pod wpływem korozji siarczanowej, „Builder” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.8018

**Streszczenie:** Kominy przemysłowe są poddawane niekorzystnym wpływom środowiskowym powodujących często degradację konstrukcji, wywołaną między innymi korozją siarczanową. Celem badań niniejszej pracy była weryfikacja autorskiej adaptacji modelu korozji siarczanowej, w szczególności oszacowania zakresu parametrów tego modelu dla rzeczywistych konstrukcji, na których autorzy prowadzili badania *in situ*. Stosując analizę odwrotną i korzystając z uzyskanych wyników badań, oszacowano realne zakresy parametrów procesu dyfuzji i korozji siarczanowej. Przeprowadzone na tej bazie analizy numeryczne procesu dają akceptowalną w pewnym zakresie zgodność z obserwacja-

Krystalizacja ettringitu jest reakcją ekspansywną, w której objętość cząsteczek ettringitu jest zwykle wielokrotnie większa niż objętość składników, z których ona powstaje, co wywołuje w materiale wewnętrzne ciśnienie, które prowadzi do powstawania mikrorys i w konsekwencji uszkodzeń materiału.

mi na obiektach rzeczywistych. Wyniki wskazują jednocześnie, że zwiększenie dokładności odwzorowania procesów rzeczywistych będzie wymagało uwzględnienia w modelu wpływu temperatury na parametry modelu. **Słowa kluczowe:** żelbetowy komin przemysłowy, korozja siarczanowa, analiza odwrotna, analiza numeryczna procesu degradacji siarczanowej

**Abstract:** DEGRADATION NUMERICAL ANALYSIS OF THE REINFORCED CONCRETE CHIMNEY UNDER THE SULFATE CORROSION PROCESS. Industrial chimneys are exposed to the adverse environmental influences often causing structure degradation, among other, by the sulfate corrosion. In this paper verification of authors adaptation of sulfate diffusion model is presented. In particular estimation the model parameters for the real structures was done (for which *in situ* tests were done). Using the results of the chemical tests of the chimney the reverse analysis was used to estimate the real steering parameters of the sulfate diffusion process and sulfate corrosion. Based on these estimated parameters the numerical analysis was carried out. Obtained results are in acceptable manner compatible with what is observed on real degraded chimney. Additionally, obtained results indicate that the temperature impact on the process is needed to be included into the model.

**Keywords:** reinforced concrete chimney, sulfate corrosion, reverse analysis, numerical analysis of the sulfate corrosion process

REKLAMA

## Moc rozwiązań.

Systemy naprawcze  
Powłoki ochronne  
Impregnaty hydrofobizujące



**HUFGARD POLSKA Sp. z o.o.**  
42-209 Częstochowa, ul. Rząsawska 44/46  
tel. +48 34 360 46 94, fax +48 34 360 46 98  
www.pt-polska.com, e-mail: biuro@hufgard.pl

