

ADAM ZABORSKI\*

## ZASTOSOWANIE AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH DO NUMERYCZNEJ SYMULACJI BETONU POD OBCIĄŻENIEM

---

### APPLICATION OF CELLULAR AUTOMATA SIMULATION TO CONCRETE CORROSION DAMAGE UNDER LOADING

#### Streszczenie

Przedstawiony model korozji betonu uwzględnia synergistyczne oddziaływanie obciążenia i degradacji chemicznej. Wykazano efektywność zastosowania automatów komórkowych do symulacji sprzężonych przepływów dyfuzyjnych przy zmiennej przepuszczalności ośrodka.

*Słowa kluczowe: korozja betonu, kontynualna mechanika uszkodzeń, automaty komórkowe*

#### Abstract

Multiscale simulation by the cellular automata to diffusion in porous material has been applied. Multilevel synergic effect of loading and chemical activity has been considered. The effective stress has been employed for both equilibrium and evolution equations.

*Keywords: concrete corrosion, continuum damage mechanics, cellular automata*

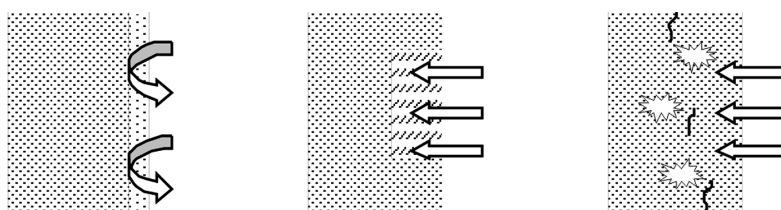
---

\* Dr inż. Adam Zaborski, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Zniszczenie korozyjne elementów betonowych i żelbetonowych jest problemem o istotnym znaczeniu ekonomicznym. Struktura materiału jest złożona, a procesy degradacyjne zachodzące wewnątrz niego są złożone i różnorodne. Większość z nich to reakcje topochemiczne, identyfikowane i wyjaśniane na poziomie mikro. Ilościowe efekty tych procesów są jednak z reguły szacowane na znacznie wyższym poziomie makro, wskutek czego informacje dotyczące oddziaływań na poziomie mikro są mocno okrojone. Właściwe modelowanie zjawisk zachodzących w szerokim zakresie wielu skal wymaga modelowania wieloskalowego, łączącego w jedną całość mechanizmy i procesy zachodzące w różnych skalach [1], [2].

Model prezentowany w niniejszym artykule stanowi kompromis pomiędzy złożonością modelu strukturalnego, prostotą oszacowań do celów praktycznych a ogólnością umożliwiającą zastosowanie do szerszej klasy problemów. Jednak z uwagi na ogromną różnorodność zjawisk korozyjnych w niniejszej pracy modelowanie ograniczono do korozji drugiego rodzaju (rys. 1), w której procesy chemiczne wpływają na przepuszczalność ośrodka, będącą monotoniczną funkcją stałej postępu reakcji. Nie uwzględnia się procesów prowadzących do korozji zbrojenia.



Rys. 1. Korozja: ługowania, chemiczna i chemiczna ze zmianą struktury matrycy  
Fig. 1. Corrosion: leaching, chemical and chemical with structural changes

Szczególną cechą prezentowanego modelu jest uwzględnienie synergistycznego oddziaływania na materiał środowiska agresywnego i obciążenia. Działania obu tych czynników, wyjąwszy nieliczne przypadki szczególne, wzmacniają się wzajemnie, przyspieszając degradację materiału. Korozja naprężeniowa jest tym wyraźniejsza, im bardziej kruchy jest materiał [5].

## 2. Procesy transportu i wpływ obciążenia

Postęp korozji betonu, niezależnie od rodzaju oddziaływań, w decydującym stopniu zależy od prędkości, z jaką czynnik agresywny wnika w głąb materiału. Są trzy główne siły napędowe tego procesu [1]:

- gradient ciśnienia, od którego zależy prędkość procesów filtracji
- gradient stężenia, warunkujący szybkość procesów dyfuzji,
- gradient potencjału elektrycznego wpływający na ruch cząstek elektrycznie nieojojętnych [6].

Sytuację komplikuje fakt, że najczęściej substancji wnikaających jest kilka i pojawiają się sprzężenia pomiędzy ich wzajemnymi ruchami, jak ma to miejsce podczas dyfuzji

wilgoci i chlorków [7]. Ponadto, zależnie od skali zmieniają się mechanizmy procesów [8], i w niektórych przypadkach, [9], obserwuje się istnienie progowego rozmiaru szczeliny umożliwiającego transport medium.

Prędkość transportu zależy też od fazy będącej nośnikiem procesu. Na przykład ruch jonów może odbywać się jedynie w fazie ciekłej. Dlatego nawilżenie betonu, którego stopień może być oszacowany poprzez uśrednienie w różnych skalach [10], ma w pewnych sytuacjach ogromne znaczenie, znacząco wpływając na szybkość transportu, różniącą się nawet o kilka rzędów [11].

Nie istnieje jednoznaczna zależność przepuszczalności i porowatości. Choć porowatość rzeczywista i właściwa powierzchnia wewnętrzna są łatwe do określenia na podstawie płaskiego przekroju i zależności stereologicznych jako powierzchnia pustek i łączna długość brzegu [12], o efektywnych możliwościach transportu decydują także inne trudno mierzalne parametry mikrostruktury, jak: istnienie połączeń pomiędzy porami [13], ich przelotowość (pustki zamknięte i otwarte) [14] oraz sam ich kształt, określany jako krętość kapilar [11]. Ponieważ transport dyfuzyjny jest kontrolowany zasadniczo przez fazę najbardziej przepuszczalną, można często problem wieloskalowości rozwiązać ograniczając rozważania do określonej skali.

Wpływ naprężenia na szybkość procesów degradacji betonu nie jest zbyt wielki; naprężenie w granicach poziomu naprężeń projektowych (do ok. 0,5 wytrzymałości doraźnej), nie powoduje istotnej degradacji struktury i jego działanie w całości sprowadza się do odkształceń typu dylatacyjnego [15–17]. Próg ten jest zresztą różny u różnych autorów i osiąga niekiedy nawet wartość 0,9 wytrzymałości doraźnej, np. [18]. Nie zawsze też efekt synergistyczny jest notowany; najczęściej zależy to od poziomu i znaku naprężeń [3] i jest wyraźnie wyższy przy obciążeniach powtarzalnych. Dla wyższych poziomów naprężenia wzrost przepuszczalności staje się znaczący, w końcowym etapie narastając lawinowo gdy naprężenia osiągają poziom 75–95% wytrzymałości doraźnej. Transport czynnika staje się przepływem typu Poiseuilla z ciśnieniem i lepkością fazy jako zasadniczymi bodźcami termodynamicznymi [11].

### 3. Model korozji naprężeniowej betonu

Wielofazowy, wieloskładnikowy materiał opisywany jest w ramach teorii mieszanin. Każdy ze składników posiada własną, *a priori* odmienną, kinematykę. Równania konstytutywne modelu sprowadzają się do związków fizycznych dla fazy stałej, równań transportu dla faz płynnych oraz równań ewolucji parametrów wewnętrznych struktury i procesów.

Właściwości betonu jako materiału reologicznego, tj. podlegającego pełzaniu, obdarzonego zanikającą pamięcią i starzejącego się, opisują równania pełzania w postaci równania całkowego Volterry II rodzaju. Odkształcenia szkieletu zależą od historii procesu, a jądro całkowite, będące funkcją podatności, wyraża się w postaci szeregu Dirichleta, [19]:

$$\varepsilon(t_n) = \sigma(t_0)J(t_n, t_0) + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\sigma(t_i)J(t_n, t_i). \quad (1)$$

Równania transportu dla ciekłych faz, przy założeniu elektrycznej obojętności dla przemiany izotermicznej, można zapisać [1]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} - \operatorname{div}(D_i \mathbf{grad}(c_i) - c_i \mathbf{v}) + r_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

gdzie ostatni człon zawiera źródła wynikające z przebiegających reakcji chemicznych. Jeżeli prędkość czynnika występującego w powyższym równaniu w członie konwekcyjnym wyrazić przez ([1]):

$$\mathbf{v} = -D_w \mathbf{grad}(w), \quad (3)$$

to można pokazać, wychodząc z relacji Onsagera [20], że jest to równoznaczne z uwzględnieniem efektów krzyżowych pomiędzy przepływami. Jest tak, gdy np. ruch wilgoci staje się dodatkowym nośnikiem dla substancji agresywnej. W niektórych przypadkach, zależnie od wielkości liczby kryterialnej Pecleta, jeden z przepływów (dyfuzyjny albo konwekcyjny) może być pominięty [21].

Występujące w powyższych równaniach współczynniki dyfuzji  $D_i$  nie są wartościami stałymi i zależą od wielu czynników, jak np. [1, 22, 23]: obecności wody (saturacji), temperatury, stężenia czy postępu reakcji chemicznej:

$$D_i = D_{i0} \cdot F_1(h) \cdot F_2(T) \cdot F_3(c_i) \cdot F_4(K) \cdot F_5(\epsilon). \quad (4)$$

Jak wspomniano wcześniej, kluczowe znaczenie posiada saturacja oraz porowatość. Wpływ temperatury w niniejszym modelu pominięto.

O ile zależność współczynnika dyfuzji od wilgotności wydaje się być powszechnie przyjęta w postaci zaproponowanej w [23], o tyle zależność współczynnika dyfuzji od zmiennej porowatości jest bardziej złożona i określana na wiele sposobów bezpośrednio z badań doświadczalnych. Wybrana została najprostsza empiryczna zależność dyfuzyjności wprost od liczby postępu reakcji [22], w postaci:

$$F_4(K) = 1 - \zeta K, \quad \zeta \in (0, 1). \quad (5)$$

Ponieważ zależność współczynnika dyfuzji od odkształceń typu dylatacyjnego jest zauważalna, choć niezbyt znacząca, ograniczono się do wstawienia dodatkowego członu liniowo aproksymującego wyniki badań [16]:

$$F_5(\epsilon) = 1 + k_{rc} I_1, \quad (6)$$

gdzie  $I_1$  jest pierwszym niezmiennikiem tensora odkształcenia a współczynnik  $k_{rc}$  uwzględnia nieizotomiczne właściwości materiału (na ściszenie i rozciąganie). Na warunki przepływu ma wpływ również degradacja materiału spowodowana obciążeniem mechanicznym. Mikrouszkodzenia w postaci płaskich, „soczewkowych” spękań, mają charakter anizotropowy, a przepływ w takich rysach jest opisywany zwykle nie przepływem dyfuzyjnym, lecz – analogicznie do metod mechaniki górotworu – równaniami płaskiego przepływu Poiseuille’a [25]. Takie efekty zostały w proponowanym modelu pominięte.

#### 4. Równania ewolucji

Z termodynamiki procesów nieodwracalnych kontinuum ze zmiennymi wewnętrznymi stanu, nierówność Clausiusa-Duhema dla lepkosprężystego kontinuum można zapisać [26, 27]:

$$\boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}} - \dot{\psi}(\boldsymbol{\epsilon}, \mathbf{q}_a) \geq 0, \quad (7)$$

gdzie drugi człon przedstawia pochodną energii swobodnej Helmholtza, a  $\mathbf{q}_a$  jest układem zmiennych wewnętrznych stanu. Zakładając liniową zależność pomiędzy bodźcami termodynamicznymi a zmiennymi stanu, otrzymuje się z nierówności Clausiusa-Duhema [24] wyrażenie na potencjał dyssypacji (czyli moc dyssypacji, [4]). Stosując zasadę maksimum energii dyssypacji, [28], problem formułuje się jako zadanie nieliniowej optymalizacji z ograniczeniami w postaci warunków Kuhna-Tuckera, zawierających równania ewolucji zmiennych wewnętrznych stanu: stałej postępu reakcji chemicznej oraz parametru uszkodzenia.

Postęp reakcji chemicznej zależy od transportu substratów na miejsce reakcji:

$$\frac{dK}{dt} = \chi \langle c_a - c_{a0} \rangle_+, \quad (8)$$

gdzie  $\chi, c_{a0}$  są doświadczalnymi parametrami a nawiasy Macaulay'a oznaczają nieujemną różnicę.

Powyższe równanie jest zgrubną aproksymacją sumarycznej reakcji chemicznej zastępującej rzeczywiste złożone procesy chemiczne z reguły przebiegające wieloetapowo. Takie podejście opiera się na założeniu na tyle dużej szybkości przebiegu reakcji chemicznych, że układ znajduje się w stanie bliskim równowagi chemicznej. Decyduje o tym liczba kryterialna Damköhlera [21].

Degradacja materiału, wynikająca z procesów korozyjnych, nie wykazuje cech jakiegokolwiek ukierunkowania i w całości może być opisana skalarnym parametrem uszkodzenia. Degradacja materiału spowodowana obciążeniem mechanicznym wykazuje nie tylko cechy ukierunkowania, ale także silnie zależy od znaku odkształceń. Dekompozycja parametru uszkodzenia na części chemiczną i mechaniczną, mające różne źródło powstania, jest prosta jedynie w przypadku wielkości skalarnej [29]; dla wielkości tensorowych dekompozycja jest złożona i pojawiają się interakcje różnych składowych zniszczenia. Dlatego ograniczono się do przypadku skalarnego parametru uszkodzeń, opisującego naprężenia efektywne:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{(1 - d_{ch})(1 - d_m)}, \quad (9)$$

gdzie  $d_{ch}, d_m$  to parametry uszkodzeń opisujące odpowiednio degradację chemiczną i mechaniczną.

Równanie ewolucji parametru uszkodzenia chemicznego wyraża liniową zależność parametru od liczby postępu reakcji:

$$d_{ch} = \xi K, \quad \xi \in (0,1) \quad (10)$$

gdzie  $\xi$  jest parametrem empirycznym. Równanie ewolucji uszkodzeń mechanicznych przyjęto za [28] w postaci wykładniczej funkcji uszkodzeń:

$$d_m = 1 - \frac{\eta_0}{\eta} [1 - \alpha_m + \alpha_m \exp[\beta_m (\eta_0 - \eta)]], \quad \eta(\varepsilon) = \sqrt{\frac{1}{E_0} \varepsilon : C_0 : \varepsilon} \quad (11)$$

gdzie parametry  $\alpha_m, \beta_m$  są parametrami doświadczalnymi a  $\eta(\varepsilon)$  jest miarą odkształceń ekwiwalentnych i posiada wartość progową  $\eta_0$  [28].

### 5. Dyskretyzacja równań – automaty komórkowe

Równolegle do tradycyjnych metod rozwiązywania zagadnień brzegowych (MES, MRS itp.) pojawiły się metody opisujące dyskretne procesy bezpośrednio dyskretnym modelem. Wiele z tych metod to metody ogólnego zastosowania, jak sieci neuronowe, algorytmy genetyczne czy automaty komórkowe, znajdujące zastosowania w wielu dziedzinach obliczeń inżynierskich. Oprócz nich pojawiły się też metody specjalnie dedykowane dla ośrodka porowatego, jak np. metoda siatki Bethe, wywodząca się z teorii perkolacji czy metoda gazu siatkowego Boltzmanna [30] opierająca się na spostrzeżeniu, że skomplikowane przepływy cieczy, również w ośrodkach porowatych, są wynikiem oddziaływania ze sobą dużej ilości cząstek zgodnie z newtonowskimi równaniami ruchu. Ustalając sztuczny zestaw reguł dla zderzeń i rozchodzenia się identycznych cząstek po regularnej siatce, można modelować wiele zagadnień hydrodynamiki. Praktycznie jednak modelowanie ośrodka porowatego nastrocza pewnych trudności, związanych z niejednoznacznością obrazu uzyskanego za pomocą tomografii komputerowej [31].

Nieporęczna numerycznie procedura ADI dla równań transportu z powodzeniem może być zastąpiona metodą prostych automatów komórkowych Neumanna, [32]. Symulacja polega na serii uaktualnień stanu na podstawie reguły automatu, identycznej dla wszystkich komórek a uwzględniającej stan najbliższego otoczenia: „sąsiadów” komórki, przy założeniach, że:

- przestrzeń jest podzielona na regularne komórki,
- stan każdej z komórek określa właściwy jej parametr stanu, który przyjmuje wartości z ograniczonego zbioru dyskretnych wartości,
- lokalna reguła automatu jest stosowana na każdym kroku czasowym,
- reguła uzależnia stan komórki od stanu jej sąsiadów (w sensie Neumanna),
- współczynnik dyfuzji jest w toku procesu w każdej komórce jednakowy i ma stałą wartość.

Ostatnie założenie w połączeniu z drugim stanowi istotne ograniczenie modelowania procesów transportu. Dlatego proponuje się istotne modyfikacje powyższego modelu [20]. O ile przyjęcie parametru stanu komórek w postaci liczby rzeczywistej jest niewielką zmianą, o tyle uwzględnienie zmienności współczynnika dyfuzji wymaga wprowadzenia czasu jako zmiennej niezależnej i cechowania każdej z komórek z osobna, ale według tej samej reguły. Koncepcja formalnie nawiązuje do postaci *explicite* schematu metody różnic skończonych, lecz może także być uważana za wyjściową formę symulacji procesu transportu:

$$\frac{\bar{c}_{m,n} - c_{m,n}}{8D\Delta t} \Delta x^2 = \frac{1}{8} (c_{m+1,n} + c_{m,n+1} + c_{m-1,n} + c_{m,n-1}) - \frac{1}{2} c_{m,n}. \quad (12)$$

Wykonując odpowiednie podstawienie, otrzymujemy regułę automatu:

$$\frac{4D\Delta t}{\Delta x^2} \equiv \alpha \rightarrow \bar{c}_{m,n} = c_{m,n} (1 - \alpha) + \frac{\alpha}{4} (c_{m+1,n} + c_{m,n+1} + c_{m-1,n} + c_{m,n-1}), \quad (13)$$

z warunkiem stabilności:  $\alpha \leq 0.5$ .

W przypadku kilku przepływów ze sprzężeniami reguła automatu może być zmodyfikowana na przypadek współczynników dyfuzji sprzężonych (dla  $i \neq j$ ):

$$\begin{aligned} \frac{4D_{ij}\Delta t}{\Delta x^2} \equiv \alpha^{ij} \rightarrow \bar{c}_{m,n} = c_{m,n} (1 - \alpha^{ii}) + \frac{\alpha^{ii}}{4} (c_{m+1,n} + c_{m,n+1} + c_{m-1,n} + c_{m,n-1}) - \\ - \sum_{j \neq i} \alpha^{ij} c_{m,n}^j + \sum_{j \neq i} \frac{\alpha^{ij}}{4} (c_{m+1,n}^j + c_{m,n+1}^j + c_{m-1,n}^j + c_{m,n-1}^j), \end{aligned} \quad (14)$$

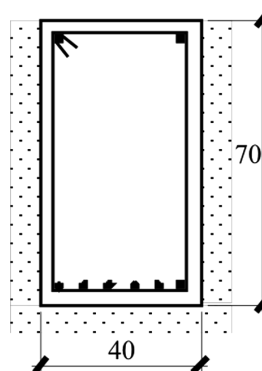
gdzie indeks  $j \neq i$  odnosi się do przepływów sprzężonych.

## 6. Przykłady numeryczne

Dla ilościowego zilustrowania zarówno proponowanego modelu, jak i efektywności automatów komórkowych, wykonano testy numeryczne dla obciążenia środowiskowego w postaci 10% azotanu amonu (V) (rys. 2).

Obliczenia równoległe zweryfikowane zostały metodą klasyczną ADI, naprzemiennych kierunków całkowania dla schematu Peacemana-Rachforda [33].

Symulacja automatami komórkowymi okazała się nie tylko efektywna (znacznie mniejsza liczba operacji arytmetycznych), ale także i równie dokładna przy dwukrotnie zagęszczonej siatce.



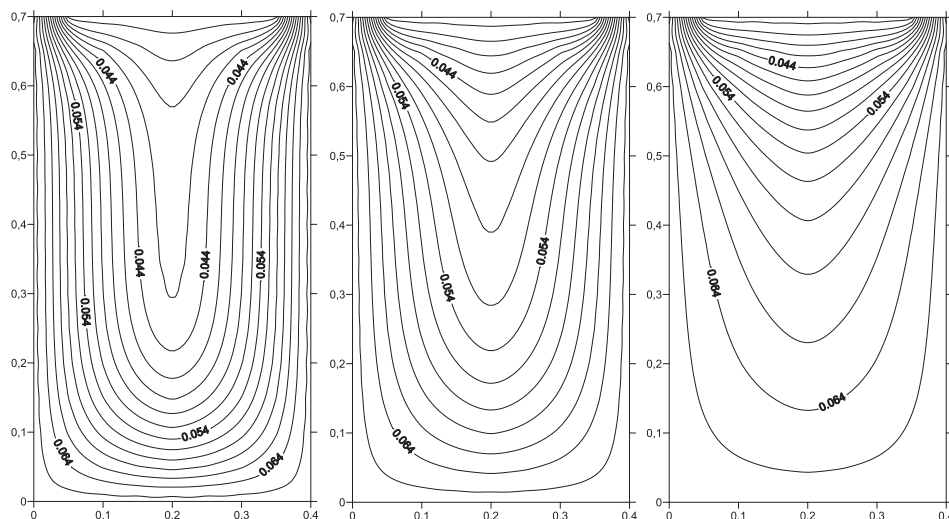
Rys. 2. Przekrój poprzeczny z oddziaływaniem środowiskowym

Fig. 2. Cross-sections with environmental actions

Profile koncentracji dla przepływów niesprężonych i sprzężonych wskazują, że jeden z przepływów (z reguły jest to przepływ wilgoci) może służyć jako nośnik innego

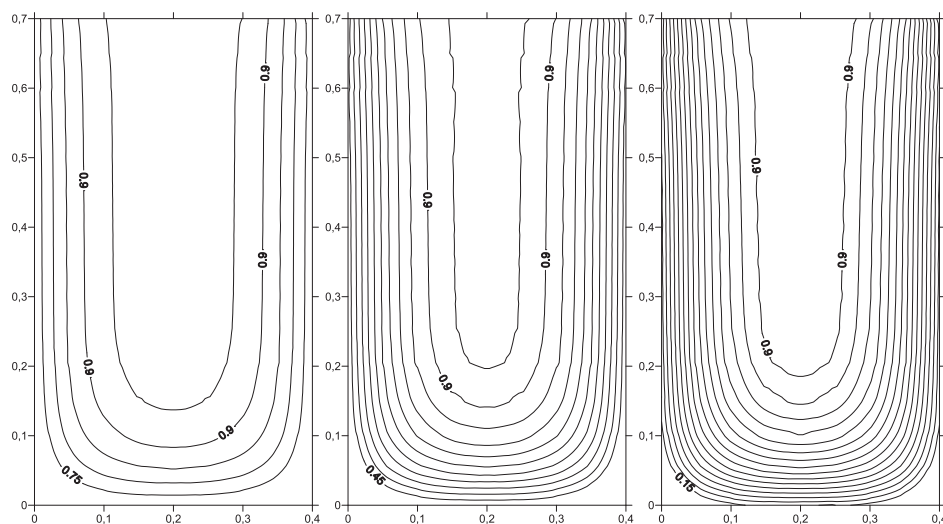


przepływu (np. jonowego), znacznie go wspomagając. Efekty krzyżowe pomiędzy przepływem skoniugowanym (prostym) i sprzężonym narastają w czasie trwania procesu.



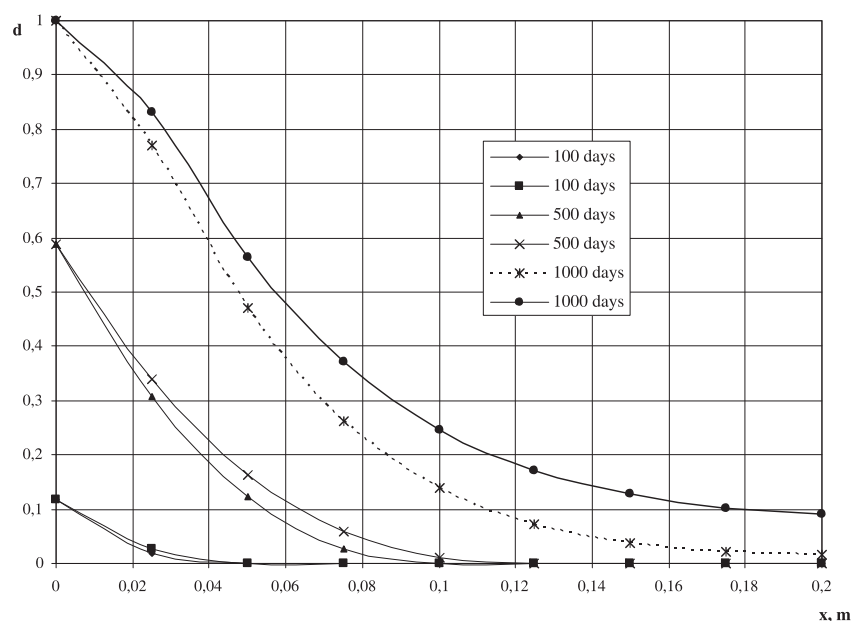
Rys. 3. Warstwy koncentracji azotanu amonu: 500, 1000 i 2000 dni  
Fig. 3. Concentration contours of ammonium nitrate: 500, 1000 and 2000 days

Kolejne rysunki (3) i (4) przedstawiają typowe profile koncentracji oraz izolinie parametru uszkodzenia. Widoczny jest na nich wpływ obciążenia, przejawiający się zaburzeniem symetrii rozwiązania. Dwuwymiarowy przepływ w okolicach naroży przekroju objawia się charakterystycznym zaokrągleniem izolinii koncentracji i uszkodzenia.



Rys. 4. Profile parametru uszkodzenia: 500, 1000 i 2000 dni  
Fig. 4. Damage parameter contours: 500, 1000 and 2000 days





Rys. 5. Profile parametru uszkodzenia dla różnych parametrów anizotropii  
Fig. 5. Profiles of damage parameter for different anisotropy parameters

Szybsze postępy korozji po stronie rozciąganej przekroju (rys. 5) mają niewielki wpływ na całkowitą nośność przekroju, co potwierdza znany fakt, że o spadku nośności przekroju decyduje degradacja strefy ściskanej betonu i – jeśli występuje – korozja zbrojenia głównego.

## 7. Wnioski

Uzyskane wyniki wskazują, że – mimo istotnych uproszczeń opisu złożonych zjawisk korozji chemicznej betonu – przedstawiony model dobrze oddaje zasadnicze cechy przebiegających procesów w materiale z uwzględnieniem stopnia jego saturacji.

Przytoczone przykłady symulacji numerycznych unaoczniają tezę o synergistycznym, tj. wzajemnie wzmacniającym się, działaniu obciążenia mechanicznego i procesów degradacji chemicznej.

Otrzymane wyniki numeryczne potwierdzają tezę, że o spadku nośności przekroju żelbetowego decydują procesy degradacji w ściskanej strefie przekroju.

Stan naprężenia w zakresie nominalnych obciążeń eksploatacyjnych wywiera znacznie mniejszy wpływ na procesy degradacji przekroju żelbetowego niż warunki przepływu, jakie stwarza saturacja czy porowatość struktury szkieletu betonowego. Parametr uszkodzenia mechanicznego, rosnący gwałtownie w końcowym etapie procesu, prowadzi do lokalizacji uszkodzenia w postaci makroskopowego zarysowania. Zmienia to warunki oddziaływania środowiskowego na tyle, że dalsze zastosowanie dyfuzyjnego opisu procesów transportu staje się nieuzasadnione.

Proste automaty komórkowe z otoczeniem von Neumanna po szeregu modyfikacjach okazują się w pełni efektywnym narzędziem obliczeniowym, umożliwiającym symulację sprzężonych przepływów w anizotropowym ośrodku porowatym o zmiennej dyfuzyjności, zależnej od wielu czynników, takich jak, koncentracja, zawilgocenie, porowatość, stan naprężenia i inne. Istnieje możliwość kolejnych udoskonaleń symulacyjnych właściwości automatów komórkowych na równania adwekcji, konwekcji czy też ruchu jonów w ośrodku elektrycznie nieobojętnym. Uwzględnienie efektów nielokalnych przez zwiększenie promienia automatu von Neumanna umożliwi opis propagacji szczeliny [34].

### Literatura

- [1] Glasser F.P., Marchand J., Samson E., *Durability of concrete – Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions*, Cement and Concrete Research, 38, 2008, 226-246.
- [2] Xi Y.B., Willam K., Frangopol D.M., *Multiscale modelling of interactive diffusion processes in concrete*, Journal of Engineering Mechanics, 126, 2000, 3, 258-265.
- [3] Kamali S., Gérard B., Moranville M., *Modeling the leaching kinetics of cement-based materials – influence of materials and environment*, Cement & Concrete Composites, 25, 2003, 451-458.
- [4] Coussy O., *Poromechanics*, John Wiley & Sons Ltd, 2004, 283.
- [5] Nägele E., *New and powerful method for the evaluation of multiparameter corrosion tests*, Cement and Concrete Research, 25, 1995, 6, 1208-1217.
- [6] Samson E., Marchand J., Beaudoin J.J., *Describing ion diffusion mechanisms in cement-based materials using the homogenization technique*, Cement and Concrete Research, 29, 1999, 1341-1345.
- [7] Ababneh A., Benboudjema F., Xi J., *Chloride penetration in nonsaturated concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, 15, 2003, 2, 183-191.
- [8] Sercombe J., Viadal R., Gallé C., Adenot F., *Experimental study of gas diffusion in cement paste*, Cement and Concrete Research, 37, 2007, 579-588.
- [9] Ismail M., Touni A., Francois R., Gagne R., *Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in inert materials*, Cement and Concrete Research, 34, 2003, 711-716.
- [10] Ishida T., Maekawa K., Kishi T., *Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history*, Cement and Concrete Research, 37, 2007, 565-578.
- [11] Scherer G.W., Valenza J.J., Simmons G., *New methods to measure liquid permeability in porous materials*, Cement and Concrete Research, 37, 2007, 386-397.
- [12] Wong H.S., Buenfeld N.R., Head M.K., *Estimating transport properties of mortars using image analysis on backscattered electron images*, Cement and Concrete Research, 36, 2006, 1556-1566.
- [13] Yang C.C., *On the relationship between pore structure and chloride diffusivity from accelerated chloride migration test in cement-based materials*, Cement and Concrete Research, 36, 2006, 1304-1311.

- [14] Ye G., *Percolation of capillary pores in hardening cement pastes*, Cement and Concrete Research, 35, 2005, 167-176.
- [15] Schneider U., Chen S.-W., *Deterioration of high-performance concrete subjected to attack by the combination of ammonium nitrate solution and flexure stress*, Cement and Concrete Research, 35, 2005, 1705-1713.
- [16] Schneider U., Chen S.-W., *The chemomechanical effect and the mechano-chemical effect on high-performance concrete subjected to stress corrosion*, Cement and Concrete Research, 28, 1998, 509-522.
- [17] Choinska M., Khelidj A., Chatzigeorgiou G., Pijaudier-Cabot G., *Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete*, Cement and Concrete Research, 37, 2007, 79-88.
- [18] Saito M., *Chloride permeability of concrete under static and repeated compressive loading*, Cement and Concrete Research, 25, 1995, 803-808.
- [19] Lee Y., Yi S.-T., Kim M.-S., Kim J.-K., *Evaluation of a basic creep model with respect to autogenous shrinkage*, Cement and Concrete Research, 36, 2006, 1268-1278.
- [20] Zaborski A., *Concrete elements durability in aggressive environments: cellular automata simulation*, in: Environmental effects on buildings, structures, materials and people, Lublin Univ. of Techn., Lublin 2007, 303-312.
- [21] Samson E., Marchand J., *Modeling the transport of ions in unsaturated cement-based materials*, Computers and Structures, 85, 2007, 1740-1756.
- [22] Saetta A.V., Vitaliani R.V., *Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation*, Cement and Concrete Research, 34, 2004, 571-579.
- [23] Saetta A.V., Scotta R., Vitaliani R., *Mechanical behavior of concrete under physical-chemical attacks*, Journal of Engineering Mechanics, 124, 1998, 10, 1100-1109.
- [24] Meschke G., Grasberger S., *Numerical modeling of coupled hygro-mechanical degradation of cementitious materials*, Journal of Engineering Mechanics, 129, 2003, 4, 383-392.
- [25] Bangert F., Grasberger S., Kuhl D., Meschke G., *Environmentally induced deterioration of concrete: physical motivation and numerical modeling*, Engineering Fracture Mechanics, 70, 2003, 891-910.
- [26] Nguyen V.H., Nedjar B., Torrenti J.-M., *Chemo-mechanical coupling behavior of leached concrete. Part II: Modeling*, Nuclear Engineering and Design, 237, 2007, 2090-2097.
- [27] Fafard M., Boudjelal M.T., Bissonnette B., Cloutier A., *Three-dimensional viscoelastic model with nonconstant coefficients*, Journal of Engineering Mechanics, 127, 2001, 8, 808-815.
- [28] Kuhl D., Bangert F., Meschke G., *Coupled chemo-mechanical deterioration of cementitious materials. Part I: Modeling*, Int. Journal of Solids and Structures, 41, 2004, 15-40.
- [29] Kattan P.I., Voyiadjis G.Z., *Decomposition of Damage Tensor in Continuum Damage Mechanics*, Journal of Engineering Mechanics, 129, 2001, 9, 940-944.
- [30] Rothman D. H., Zaleski S., *Lattice-gas cellular automata. Simple models of complex hydrodynamics*, Cambridge University Press, 1997, 297.

- [31] Kutay M.E., Aydilek A.H., Masad E., *Laboratory validation of lattice Boltzmann method for modeling pore-scale flow in granular materials*, Computer and Geotechnics, 33, 2006, 381-395.
- [32] Biondini F., Bontempi F., Frangopol D.M., Malerba P.G., *Cellular automata approach to durability analysis of concrete structures in aggressive environments*, Journal of Structural Engineering, 130, 2004, 11, 1724-1737.
- [33] Zaborski A., *Corrosion of reinforced concrete due to stress-assisted diffusion*, Archive of Civil Engineering, 41, 1995, 447-460.
- [34] Mazars J., Pijaudier-Cabot G., *From damage to fracture mechanics and conversely: a combined approach*, Int. Journal of Solids and Structures, 33, 1996, 20-22, 3327-3342.