

Dr hab. inż. Jerzy Pamin, prof. PK  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Politechniki Krakowskiej  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
e-mail JPamin@L5.pk.edu.pl

Kraków, 28.08.2008

**Recenzja**  
**pracy doktorskiej mgr. inż. Witolda Węglewskiego pt.**  
*Modelowanie zniszczenia betonu*  
*wywołanego korozją siarczanową*

**1. Ocena trafności wyboru tematyki i ogólna charakterystyka pracy**

Praca doktorska mgr. inż. Witolda Węglewskiego, będąca wynikiem badań prowadzonych pod kierunkiem doc. dr. hab. inż. Michała Basisty w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN, dotyczy tematyki trwałości betonu, priorytetowej w obecnych badaniach stosowanych w budownictwie. Autor zajął się zagadnieniem sprzężonym chemomechaniki, badając teoretycznie i numerycznie pewne aspekty destrukcyjnego wpływu siarczanów na beton, w szczególności na jego uszkodzenie i pękanie wywołane przez ekspansję uwodnionego siarczanoglinianu wapnia zwanego ettringitem.

Tematyka korozji betonu wywołanej agresywnym środowiskiem znajduje się od dawna wśród ważnych tematów badawczych w inżynierii lądowej. Prowadzone są kompleksowe analizy doświadczalne, teoretyczne i numeryczne modeli sprzężonych procesów fizycznych, zazwyczaj niestacjonarnych. Sprzężenia te obejmują pola fizyczne (przemieszczenia, temperatura, wilgotność) i chemiczne (stężenia związków szkodliwych). Trafności wyboru tematyki pracy dowodzą prowadzone obecnie badania w wielu zespołach za granicą, np. w Institut fuer Mechanik der Werkstoffe und Strukture, Technische Universitaet Wien (prof. Ch. Hellmich), Lehrstuhl fuer Statik und Dynamik, Ruhr Universitaet Bochum (prof. G. Meschke) czy Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Universita di Padova (prof. B. Schrefler), a także w kraju, np. w Katedrze Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych Politechniki Łódzkiej (prof. D. Gawin). Powstały w ostatnich latach cenne i kompleksowe prace obejmujące teoretyczno-obliczeniowy opis chemomechanicznej degradacji betonu, np. monografie habilitacyjne D. Kuhla (*Modellierung und Simulation von Mehrfeldproblemen der Strukturmechanik*, Ruhr-Universität Bochum, 2004) czy A. Winnickiego (*Viscoplastic and internal discontinuity models in analysis of structural concrete*, Politechnika Krakowska, 2008).

Praca doktorska mgr. W. Węglewskiego pt. *Modelowanie zniszczenia betonu wywołanego korozją siarczanową* obejmuje na 108 stronach 7 rozdziałów, bibliografię z 85 pozycjami literatury i dodatek zawierający wydruk procedury do analizy MES procesu transportu siarczanów i oszacowania mechanicznych skutków ekspansji ettringitu.

W rozdz. 1 przedstawione zostały motywacja badań, przegląd literatury nt. chemicznych aspektów korozji siarczanowej betonu oraz wzory na ciśnienie krystalizacji ettringitu, podczas której następuje wzrost objętości tego związku. W rozdz. 2 podane zostały cel i zakres pracy. Celem było zbudowanie modelu sprzężonego chemomechaniki dla określenia ilościowych skutków ekspansji ettringitu w dojrzałym betonie. W rozdz. 3 przy-

pomniane zostały podstawowe równania z teorii homogenizacji, opisana metoda równoważnej inkluzji, definicja reprezentatywnego elementu objętości i metoda wewnętrznie zgodna. Autor pokazał też, że koncepcja perkolacji pozwala na oszacowanie dwu progowych wartości skalarnego parametru uszkodzenia (gęstości uszkodzeń). Jest to próg odpowiadający połączeniu mikroszczelin w ciągły kanał umożliwiający transport siarczanów przez materiał i próg odpowiadający zaawansowanej destrukcji, umożliwiającej natychmiastową dyfuzję tych związków.

Najważniejszy w pracy rozdział 4 jest poświęcony przedstawieniu modelu uszkodzenia betonu, wywołanego korozją siarczanową. Model ten obejmuje równanie niestacjonarnego procesu dyfuzji, określenie członu reakcyjnego w tym równaniu oraz oszacowanie odkształceń własnych objętościowych w kryształach ettringitu. Następnie analizowane jest tworzenie się mikroszczelin w wyniku rozpierania osnowy betonowej przez krystalizujący ettringit. Założono izotropowy rozkład okrągłych mikroszczelin i określono według pracy Mury (1987) efektywne moduły sprężystości oraz współczynnik dyfuzji jako funkcje parametru gęstości mikroszczelin. Na podstawie pracy Krajeinowica i in. (1992) przyjęto progi perkolacji. Następnie obliczone zostały efektywne odkształcenia i napężenia w kontinuum wykazującym uszkodzenie i odkształcenia własne. Rozdział kończy się analitycznym i numerycznym rozwiązaniem przykładowego zagadnienia dwuwymiarowego. Przedstawione na Rys. 4.12-4.15 wyniki obliczeń, zawierające porównanie z eksperymentem, są przekonujące, choć niepokojące jest stwierdzenie na str. 68, że dla 7% zawartości glinianu trójwapniowego zaobserwowano rozbieżność wyników, podczas gdy dla 4.3% i 8.8% zgodność jest dobra.

W rozdz. 4 założono, że ekspansywny ettringit powstaje w reakcji topochemicznej, natomiast w rozdz. 5 analizowana jest możliwość jego powstawania w reakcji w roztworze. Ciśnienie krystalizacji ettringitu zostało wyznaczone na podstawie pracy Scherera (1999) przy użyciu obliczonego przez Autora numerycznie stężenia siarczanów, choć wyraża On opinię, że bardziej poprawne byłoby skorzystanie z podejścia Hofmana (2007), tylko brak danych dotyczących współczynnika ściśliwości to uniemożliwia. Ten fragment pracy został zresztą napisany dość niejasno i budzi wątpliwości: czy  $m$  jest funkcją, czy parametrem, jak ściśliwość może nie być funkcją ciśnienia, jak uzyskano równ. (5.15) z (5.14), w którym niewiadomą funkcją wydaje się być objętość  $V$ . Wewnętrznie sprzeczne jest też sformułowanie, że "aby zachować izochoryczność procesu należy zmniejszyć objętość". Jest to o tyle ważne, że przedstawione na Rys. 5.2 wyniki byłyby silnym argumentem w dyskusji, w jakiej reakcji powstaje ettringit, gdyby analiza reakcji w roztworze nie była obciążona wątpliwościami dotyczącymi stosowalności wzoru (5.12).

W rozdz. 6 przedstawiono analizę przypadku korozji siarczanowej w próbce ściskanej, co skutkuje ortotropią mikrozarysowań. Oszacowano współczynnik intensywności naprężeń, efektywne moduły Younga i współczynniki dyfuzji. Wyznaczono zależność współczynnika dyfuzji i wzrostu objętości próbki od wielkości obciążenia ściskającego. Wydaje się, że w tematyce tego rozdziału pozostało szerokie pole do badań. Rozdz. 7 zawiera zwięzłe przedstawione wnioski z pracy. Autor podkreślił też oryginalne jej elementy. Zamiast (lub oprócz) listingu procedury obliczeniowej zawartego w załączniku, bardziej wartościowy dla czytelnika byłby schemat blokowy lub zapis algorytmu obliczeń w innej formie graficzno-tekstowej. Natomiast opis metody bisekcji jest niepotrzebny, bo ten algorytm jest trywialny i zawarty w każdej książce nt. metod numerycznych.

