

Dr hab. inż. Dariusz Gawin, prof. nadzw. PŁ
Politechnika Łódzka
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź.

Padwa, 28 lipca 2008 roku.

***Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Witolda Węglewskiego
„Modelowanie zniszczenia betonu wywołanego korozją siarczanową”***

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest Uchwała Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk z dnia 27 marca 2008 r. oraz pismo Dyrektora Instytutu z 28 marca 2008 r.

2. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska opracowana przez mgr inż. Witolda Węglewskiego z IPPT PAN w Warszawie. Promotorem pracy jest doc. dr hab. inż. Michał Basista z IPPT PAN w Warszawie. Praca liczy 108 stron i zawiera 29 rysunków, 5 tablic oraz 84 pozycje literaturowe zestawione w porządku alfabetycznym na końcu pracy (w tym 1 normę polską i 3 amerykańskie - ASTM).

3. Ogólna ocena rozprawy, ocena trafności doboru jej tematu i tytułu, sformułowania tez, jej układu i doboru źródeł

Recenzowana praca podejmuje bardzo ważną praktycznie problematykę trwałości betonu, który jest obecnie najpowszechniej stosowanym na świecie materiałem budowlanym. W szczególności praca dotyczy modelowania procesu degradacji właściwości mechanicznych i transportowych betonu wskutek korozji siarczanowej. Problematyka ta jest niezwykle aktualna i podejmuje ją obecnie wiele zespołów badawczych na świecie, o czym świadczy mnogość publikacji, zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych, ukazujących się w wiodących periodykach naukowych. Dotychczasowe prace z tej tematyki, wykonywane w naszym kraju i zagranicą, dotyczyły głównie aspektów fizyko-chemicznych procesów korozyjnych w betonie i koncentrowały się na stworzeniu ich opisu fenomenologicznego, więc podjęcie przez doktoranta próby sformułowania mikromechanicznego modelu matematycznego zjawisk degradacji betonu wskutek postępującej korozji siarczanowej należy uznać za bardzo celowe i mieszczące się w nurcie najnowszych badań światowych z tej tematyki.

W pracy sformułowano i rozwiązano dwa mikromechaniczne modele chemo-uszkodzenia betonu wywołanego przez tzw. zewnętrzną korozję siarczanową, zakładając że zachodzi ona w wyniku krystalizacji etryngitu w reakcji topochemicznej, albo że jest ona wynikiem krystalizacji etryngitu z roztworu wypełniającego pory materiału. Korzystając z opublikowanych wyników badań, dotyczących makroskopowych odkształceń próbek betonowych wskutek ekspansji produktów korozji siarczanowej, zweryfikowano eksperymentalnie wyniki uzyskane z rozwiązania równań tych modeli. Następnie rozszerzono sformułowany uprzednio model, uwzględniając dodatkowo wpływ naprężeń, wywołanych obciążeniami zewnętrznymi, na efektywne właściwości transportowe i odkształcenia elementów betonowych, w których zachodzi krystalizacja etryngitu.

Podsumowując, uważam, że tytuł rozprawy w zasadzie odpowiada jej treści (z pewnymi zastrzeżeniami, które szerzej przedstawię w dalszej części recenzji), zaś tematyka pracy została dobrana trafnie i stanowi oryginalny problem badawczy o interdyscyplinarnym charakterze, obejmując swoim zakresem współczesną chemię betonu, oraz fizykę i mechanikę materiałów porowatych.

Autor w rozdziale pierwszym, po krótkim wstępie do tematyki dysertacji, podsumowuje stan wiedzy na temat korozji siarczanowej. Ta część pracy zawiera krótkie omówienie zarówno wiedzy podręcznikowej, np. z zakresu chemii cementu, jak i klasycznych, podstawowych prac i monografii na temat korozji betonu, w tym także stosunkowo najnowszych prac z tej tematyki, tj. opublikowanych do 2005 roku. Po krótkim wstępie do problematyki trwałości konstrukcji betonowych, Doktorant omówił mechanizmy korozji siarczanowej. Następnie krótko przedstawił dwie grupy teorii, z których jedna zakłada, że ekspansywny etryngit powstaje podczas reakcji w roztworze, zaś druga, którą podziela większość badaczy, że proces ten zachodzi w reakcji topochemicznej.

Rozdział drugi zawiera sformułowanie celu naukowego pracy oraz krótkie omówienie jej zakresu i treści. Celem rozprawy jest, wg Autora, „zbudowanie sprzężonego chemo-mikrochemicznego modelu uszkodzenia i ekspansji stwardniałego betonu w wyniku zewnętrznej korozji siarczanowej”. Moim zdaniem, praca doktorska powinna zawierać sformułowanie kilku tez, które w jej treści powinny być szczegółowo przeanalizowane i w konsekwencji potwierdzone lub obalone. W recenzowanej dysertacji, o kompozycji typowej dla monografii, brak jest tego „klasycznego” układu pracy doktorskiej (której nazwa po angielsku brzmi przecież „*Ph.D. thesis*”), choć w jej treści przewija się wyraźnie teza o topochemicznym charakterze reakcji chemicznej, w wyniku której zachodzi krystalizacja etryngitu podczas postępu korozji siarczanowej.

W trzecim rozdziale Autor krótko przedstawia elementy mikromechaniki ciała stałego, które później wykorzystuje w dalszej części pracy do opisu chemo-uszkodzenia betonu. Mimo bardzo zwartej formy, dość trafnie dobrano i podsumowano, powołując się na literaturę, wybrane zagadnienia mikromechaniki, tj. rozwiązanie Eshelby’ego zadania naprężeń w materiale sprężystym, wywołanych przez odkształcenie własne w elipsoidalnej inkluzji, metodę ekwiwalentnej inkluzji, definicję i dobór Reprezentatywnego Elementu Objętościowego, wyznaczanie efektywnych modułów sprężystości materiału, szczególnie przy użyciu autokoherentnej (ang. *self-consistent*) metody homogenizacji, oraz zastosowanie teorii perkolacji w przypadku pojawienia się wzajemnego oddziaływania mikroszczelin i ich łączenia się w makroszczeliny. W tej części pracy brakuje mi choćby krótkiego omówienia metod modelowania wieloskalowego, które znajdują bardzo szerokie zastosowanie w modelowaniu kompozytów, w tym betonu, a z których korzysta przecież także Doktorant.

Rozdziały od czwartego do szóstego stanowią zasadniczą, merytoryczną część recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż. Węglewskiego.

W rozdziale czwartym sformułowano sprzężony chemo-mechaniczny model uszkodzenia betonu wywołanego korozją siarczanową. Transport jonów w porach został opisany równaniem dyfuzji z członem źródłowym, uwzględniającym ubytek masy jonów siarczanowych wskutek krystalizacji etryngitu. Następnie opisano mikroodkształcenia i naprężenia własne matrycy cementowej powstające wskutek objętościowego odkształcenia inkluzji z etryngitu, stosując metodę ekwiwalentnej inkluzji i rozwiązanie Eshelby’ego. Do wyznaczenia krytycznego warunku wzrostu mikroszczeliny w matrycy materiału, wskutek postępującej krystalizacji etryngitu, zastosowano model szczeliny typu „*penny shape*”, dla którego wyznaczono współczynniki intensywności naprężeń. Następnie, korzystając z warunku Griffitha wzrostu szczeliny, wyznaczono zależność między krytycznym promieniem mikroszczeliny a ciśnieniem krystalizacji etryngitu. Wartości efektywnych modułów sprężystości materiału z mikrouszkodzeniami oraz jego współczynnika dyfuzji wyznaczono korzystając z literaturowych rozwiązań, otrzymanych przy użyciu metody autokoherentnej (ang. *self-consistent*) teorii homogenizacji. Makroskopowe odkształcenia i naprężenia materiału wyznaczono uwzględniając uśrednione odkształcenia własne inkluzji z etryngitu oraz reakcję matrycy materiału z uszkodzeniami na naprężenia wywołane krystalizacją etryngitu. Otrzymane, ogólne zależności zastosowano do rozwiązania zagadnienia opisującego ekspansję prostopadłościenną próbki z zaczynu cementowego, zanurzonej w roztworze siarczanu sodu. Założono, że krystalizacja etryngitu jest wynikiem reakcji topochemicznej. Zadanie

dyfuzji z członem reakcyjnym rozwiązywano numerycznie, a następnie korzystając z wyprowadzonych zależności, wyznaczano parametr gęstości uszkodzeń i osiowe makroskopowe odkształcenie próbki dla różnych zawartości glinianu trójwapniowego w materiale. Wyniki obliczeń porównano z opublikowanymi danymi eksperymentalnymi Ouyanga i in. (1988), uzyskując dobrą z nimi zgodność.

W rozdziale piątym przedstawiono model chemo-uszkodzenia betonu przy założeniu, że krystalizacja etryngitu zachodzi w wyniku reakcji w roztworze. Zakładając, że reakcja chemiczna zachodzi w stanie chwilowej równowagi, oraz korzystając ze znanego z prac Scherera (1999) wzoru na ciśnienie krystalizacji, przeprowadzono analizę wpływu tego ciśnienia na nukleację i wzrost mikroszczelin w matrycy materiału. Wyniki, otrzymane z tego modelu dla makroskopowego odkształcenia próbki z zaczynu cementowego, zanurzonej w roztworze siarczanu sodu, porównano z wynikami laboratoryjnych badań Ouyanga i in. (1988). Wyraźny brak zgodności wyników teoretycznych z eksperymentem skłonił Autora pracy do sformułowania wniosku, że ekspansywny etryngit, w warunkach zewnętrznej korozji siarczanowej, powstaje w reakcji topochemicznej, a nie reakcji w roztworze.

W rozdziale szóstym uwzględniono dodatkowy wpływ zewnętrznego obciążenia ściskającego element betonowy na ciśnienie krystalizacji etryngitu i jego odkształcenia własne, wyznaczone wg modelu zaproponowanego w rozdziale czwartym (tj. przy założeniu, że etryngit powstaje w reakcji topochemicznej). W wyniku tego obciążenia, ośrodek, początkowo izotropowy, nabiera cech materiału o izotropii transwersalnej. Bazując na rozwiązaniach znanych z literatury, wyznaczono wyrażenia opisujące moduły sprężystości i wartości własne tensora dyfuzji dla tego materiału. Wyznaczono zmianę makroskopowej długości próbki z zaczynu cementowego, o różnej zawartości glinianu trójwapniowego, zanurzonej w siarczanie sodu i poddanej jednoosiowemu obciążeniu ściskającemu 50 MPa. Uzyskane wyniki, w porównaniu z tymi dla przypadku braku obciążenia zewnętrznego (rozdział 4), wskazują zdaniem Autora, że obciążenie to zmniejsza osiowe odkształcenie próbek wskutek ekspansywnej krystalizacji etryngitu w porach materiału.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie wyników badań i wnioski sformułowane przez Doktoranta, a także wskazuje kierunki badań, które jego zdaniem należałoby dalej kontynuować lub podjąć, bazując na zaproponowanej przez Niego metodyce i modelu matematycznym.

W załączniku pracy zamieszczono kod źródłowy autorskiego programu komputerowego, napisanego w języku FORTRAN, do numerycznego rozwiązywania nieliniowego, dwuwymiarowego równania dyfuzji z członem źródłowym metodą elementu skończonego. Zamieszczono tam także procedurę do rozwiązywania równań nieliniowych metodą bisekcji, którą zastosowano do wyznaczania promienia szczeliny.

Układ i kompozycja pracy są w zasadzie poprawne i logicznie wynikają z jej tematu, jednak bardziej przypominają typową publikację naukową, a nie rozprawę doktorską. Recenzowana praca jest bardzo lakoniczna, w wielu miejscach podawane są jedynie końcowe wzory uzyskane przez innych badaczy, z powołaniem na źródło literaturowe, ale bez choćby skrótowego omówienia założeń i sposobu ich wyprowadzenia. Moim zdaniem, w dysertacji doktorskiej dopuszczalne jest przytaczanie rozumowania lub wyprowadzeń wzorów innych autorów (oczywiście z powołaniem się na źródła literaturowe), jeśli ułatwia to jej zrozumienie lub jest niezbędne dla zachowania jasności wyprowadzeń wzorów lub toku wywodów teoretycznych. W kilku miejscach Autor przedstawia uzyskane przez niego wyniki jedynie w końcowej postaci, bez szczegółowego wyjaśnienia, w jaki sposób je uzyskano oraz bez pokazania pośrednich przekształceń, które do nich prowadzą. Bardzo utrudnia to lekturę pracy, gdyż wymaga częstego sięgania do tekstów źródłowych, na które powołuje się Autor. Ponadto uważam, że bardzo przydatny byłby spis symboli stosowanych przez Doktoranta, bo ich opis rozsiany jest po całej pracy, co także nie ułatwia jej lektury.

Literatura wykorzystana w rozprawie jest w zasadzie wystarczająca i została, moim zdaniem, dobrana właściwie, zwłaszcza ta dotycząca zagadnień fizyko-chemicznych zewnętrznej korozji siarczanowej. Spis obejmuje ponad osiemdziesiąt pozycji, głównie angielskojęzycznych, z których kilka ma charakter monograficzny lub które można uznać za „klasyczną” już literaturę przedmiotu. Wiele prac zostało opublikowanych w ostatnich latach – szkoda, że nie uwzględniono kilku ciekawych pozycji, które zostały opublikowane po 2005 roku, jak np. najnowsze prace Scherera lub Samsona i Marchanda. Większość czasopism w wersji elektronicznej umożliwia przecież dostęp do prac przyjętych do druku nawet na kilkanaście miesięcy przed datą ich oficjalnej publikacji (jak np. *Cement and Concrete Research*, z którego pochodzi większość prac dotyczących degradacji materiałów na bazie cementu). Brak mi także, choćby kilku najważniejszych prac, dotyczących wieloskalowego modelowania materiałów kompozytowych oraz metod numerycznego rozwiązywania sprzężonych zagadnień chemo-hydro-mechanicznych, co niewątpliwie wpłynęło negatywnie na merytoryczną wartość pracy.

4. Charakterystyka treści rozprawy i jej ocena merytoryczna

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z ośmiu rozdziałów, jednego załącznika z kodem źródłowym autorskiego programu do rozwiązywania dwuwymiarowego zadania „dyfuzji – reakcji”, napisanego w języku programowania FORTRAN, oraz spisu literatury, obejmującego 84 pozycje zestawione w porządku alfabetycznym na końcu pracy (w tym 1 normę polską i 3 amerykańskie normy ASTM, podane w spisie łącznie z innymi pozycjami). Sześć z tych prac jest autorstwa Doktoranta, a ich współautorem jest jego promotor.

Treść i zawartość poszczególnych części pracy omówiłem już w skrócie w poprzedniej części mojej recenzji, poniżej ustosunkuję się do nich merytorycznie.

Na wstępie chciałbym przedstawić dwie ogólne uwagi na temat tytułu recenzowanej pracy i stosowanej w niej metodyki, które mają, moim zdaniem, dość zasadnicze znaczenie przy jej ocenie. Zgodnie z tytułem, rozprawa dotyczy procesów degradacji chemicznej zachodzących w betonie, który jest materiałem kompozytowym o złożonej strukturze. Najnowsze prace, dotyczące modelowania procesów degradacji tego materiału, wyróżniają zwykle kilka poziomów jego struktury wewnętrznej. Pomijając oddziaływania atomowe (czyli tzw. skalę nanoskopową), najniższy, rozważany w tych pracach poziom struktury betonu, tzw. mikroskopowy, dotyczy zwykle zjawisk zachodzących w matrycy cementowej, poziom mezoskopowy – oddziaływań tej matrycy z ziarnami kruszywa, które mogą mieć rozmiary rzędu jednego do kilkunastu (czasem nawet kilkudziesięciu) milimetrów, zaś poziom makroskopowy dotyczy większych elementów, o rozmiarach znacznie przekraczających wielkość tzw. Reprezentatywnego Elementu Objętościowego (o rozmiarach rzędu ok. 100 mm wg słów Autora pracy w wierszu 18 na str. 32), aby występowało rozdzielenie skal i można było traktować materiał jako jednorodny. Promień wtrąceń etryngitu w matrycy materiału nie przekracza na ogół 100 μm (wg zdjęć pokazanych na Rysunkach 1.2 i 1.3 oraz słów Autora przedstawionych w pracy na str. 12), czyli modelowanie krystalizacji etryngitu i towarzyszących jej naprężeń dotyczy w zasadzie skali mikroskopowej.

Czy w takim razie jednorodną osnową, o której mówi się wielokrotnie w pracy, może być beton? Moim zdaniem, może nią być w najlepszym przypadku zaprawa cementowa o bardzo drobnym kruszywie, jeśli nie czysty zaczyn cementowy. Aby można było wyciągać wnioski dotyczące betonu, należałoby dotatkowo wykonać analizy w skali mezoskopowej, w której rozważałoby uszkodzoną wskutek korozji siarczanowej matrycę cementową oraz kilka ziaren kruszywa o różnych rozmiarach. Dlatego uważam, że w tytule pracy zamiast „zniszczenia betonu” powinno się raczej mówić o zniszczeniu „zaczynu cementowego” lub „zaprawy cementowej”.

Druga uwaga dotyczy zakładania *a priori*, że zniszczony wskutek korozji beton jest materiałem liniowo-sprężystym, choć badania eksperymentalne pokazują jasno, że jest on materiałem o właściwościach lepko-sprężysto-plastycznych z osłabieniem. Moim zdaniem, założenie takie

byłoby dopuszczalne i jest często stosowane dla matrycy cementowej, bo szereg makroskopowych, nieliniowych efektów może wynikać z wzajemnego oddziaływania, na poziomie mezoskopowym, sprężystych składników kompozytu o złożonej strukturze, które ulegają procesom zniszczenia (np. skutek rozwoju rys w matrycy lub w strefie kontaktu kruszywa z matrycą). Uzyskanie realistycznego opisu makroskopowych skutków degradacji betonu w warunkach korozji siarczanowej wymagałoby zatem wykonania analiz w skali mezoskopowej, a te, moim zdaniem, ze względu na zróżnicowany i często nieregularny kształt ziaren kruszywa, w ogólnym przypadku są możliwe do wykonania jedynie na drodze homogenizacji numerycznej.

Bardzo proszę, aby Doktorant podczas publicznej obrony swojej pracy, ustosunkował się do powyższych uwag i uzasadnił tytuł swojej pracy, jak i zastosowaną w niej metodykę, a w szczególności brak w jego modelu opisu zjawisk na poziomie mezo-struktury betonu.

Przejdę teraz do bardziej szczegółowej oceny merytorycznej poszczególnych części recenzowanej dysertacji.

W rozdziale pierwszym, zawierającym przegląd stanu wiedzy, Autor nie ustrzegł się kilku błędów. Reakcje chemiczne we wzorach (1.1a)-(1.3a), zapisane w notacji stosowanej w chemii cementu, nie odpowiadają reakcjom (1.1)-(1.3). Wzór uwodnionego siarczanu wapnia został zapisany w nich nieprawidłowo.

Mam zastrzeżenia do stwierdzenia na str. 11, że „... jeżeli woda wypełnia pory kapilarne, to dyfuzja jonów siarczanowych następuje szybciej ...”. Czy to oznacza, że dyfuzja tych jonów jest w ogóle możliwa bez wody? – to chyba fizycznie niemożliwe.

Moje uwagi merytoryczne do rozdziału drugiego, omawiającego cel i zakres pracy, dotyczące braku jasno sformułowanych tez rozprawy, przedstawiłem w poprzedniej części recenzji.

Podsumowując teorię perkolacji, pisze on na str. 37, że „... element jest tak zniszczony, że dyfuzja następuje natychmiast ...”. Czy to jest w ogóle fizycznie możliwe? Przecież brak utrudnień geometrycznych dla transportu jonów, wynikających ze złożonej struktury porów i kapilar materiału, opisywany zwykle przez tzw. współczynnik krętności kapilar (ang. tortuosity factor), nie oznacza wcale, że dyfuzyjny przepływ jonów nie wymaga czasu, tak jak każdy inny proces o charakterze dyfuzyjnym (np. dyfuzja jonów w naczyniu z roztworem soli). Co najwyżej współczynnik krętności przyjmuje wartość równą jedności, a proces transportu jonów zachodzi z podobną szybkością jak w naczyniu z wodą.

W rozdziale czwartym, Doktorant formułuje model matematyczny sprzężonych zjawisk chemo-mechanicznych w betonie, nie podając na wstępie podstawowych założeń tego modelu, np. dotyczących struktury tego ośrodka (czy jest on porowaty?), występowania wymiany ciepła i wilgoci (dlaczego nie uwzględnia się przepływu wody kapilarnej i ciepła?). itp. Uwaga ta dotyczy także rozdziałów piątego i szóstego. Uważam to za istotny mankament pracy.

Do opisu transportu jonów Autor stosuje równanie dyfuzji, które nie uwzględnia wprawdzie wszystkich mechanizmów fizycznych tego procesu, ale jest często stosowanym, uproszczonym jego modelem matematycznym. Model ten nie uwzględnia stopnia wypełniania porów wodą (lub innego parametru charakteryzującego zawartość wilgoci w porach, np. wilgotności względnej) oraz temperatury, co istotnie wpływa na szybkość transportu jonów w ośrodkach porowatych. Oznacza to, że w pracy rozpatrywane są jedynie materiały całkowicie wypełnione wodą w warunkach izotermicznych. Założenie to, bardzo ułatwiające analizę, nie zostało podane *explicite* w żadnym miejscu pracy, w tym także w jej tytule.

Wzory (4.37), pokazane na Rys. 4.7, zakładają wzrost współczynnika dyfuzji do nieskończoności powyżej progu perkolacji. Uważam, że mimo iż zaczerpnięte są one z literatury, nie mogą być stosowane do opisu dyfuzji jonów w tworzących się makro-szczelinach, jako że zakładają sytuację nie fizyczną, jak wyjaśniłem to w opinii merytorycznej do rozdziału trzeciego. Proszę o komentarz Doktoranta na ten temat podczas publicznej obrony Jego pracy.

Mam bardzo duże zastrzeżenia do opisu metody numerycznego rozwiązania dwuwymiarowego, nieliniowego równania Ficka z członem źródłowym (numer (4.47) w pracy). Doktorant

opisuje podręcznikowe rozwiązanie zagadnienia liniowego, z pominiętym członem źródłowym, który wg jego słów „nie będzie wyznaczany metodą elementów skończonych, ale odejmowany po każdej pętli obliczeń”. Podczas rozwiązania zagadnienia (4.37) przy użyciu MES, po jego uprzednim przekształceniu do sformułowania słabego, całkujemy wszystkie jego człony w obszarze pojedynczego elementu skończonego lub jego brzegu, w tym także człon źródłowy, więc nie można go po prostu odjąć od pozostałej, scałkowanej części równania. Opis rozwiązania MES takiego nieliniowego zagadnienia można znaleźć w szeregu podręczników tej metody, np. w powszechnie dostępnej książce Zienkiewicza i Taylora, czy też, dotyczącej zagadnień typowych dla ośrodków porowatych, książce Lewisa i Schreflera. Doktorant stosuje jawny schemat całkowania po czasie równania dyfuzji (nie jest to nigdzie podane w pracy), co nie znaczy, że rozwiązuje zadanie liniowe, które opisuje. W takim przypadku istnieją silne ograniczenia dla długości kroku czasowego, aby uzyskać rozwiązanie zbieżne i zgodne. Czy zostało to uwzględnione i sprawdzone przez Autora? Czy rozwiązanie napisanego przez niego programu zostało w jakikolwiek sposób sprawdzone? W końcu, dlaczego nie zastosował on innego schematu czasowego, lepiej dostosowanego do analizowanego zagadnienia, np. w pełni niejawnego, który niezależnie od długości kroku czasowego, zawsze daje rozwiązanie zbieżne. Bardzo proszę, aby Doktorant podczas publicznej obrony swojej pracy przedstawił prawidłowy opis rozwiązania, który odpowiada treści Jego programu komputerowego, jak i rzeczywistego zadania, które rozwiązuje.

Przed ewentualną publikacją pracy, zwłaszcza z czasopiśmie o charakterze numerycznym, sugeruję poprawienie wspomnianych przeze mnie błędów w opisie rozwiązania numerycznego.

Pragnę też wyrazić zdziwienie, że uwagi te muszą kierować do doktoranta z IPPT PAN w Warszawie, który jest przodującym ośrodkiem, nie tylko w Polsce, zajmującym się mechaniką komputerową i metodami numerycznymi.

Przy sformułowaniu i rozwiązaniu zadania dyfuzji jonów siarczanowych na str. 65 nie podano w ogóle przyjętych warunków brzegowych. Patrząc na wyniki, wydaje się, że było to zagadnienie Dirichleta. Obliczając makroskopowe odkształcenie osiowe próbki, Doktorant rozwiązuje najpierw zadanie odwrotne, aby wyznaczyć stałą reakcji k (str. 67). Píše, że „...wyznaczono najlepsze dopasowanie wyników ekspansji do danych doświadczalnych dla zawartości $C_3A=4.3\%$.” Jakie kryterium doboru stałej k stosowano, skoro na wykresie na Rys. 4.14 wyraźnie widać, że najbardziej zgodne z doświadczeniem są wyniki dla stężenia $C_3A=12\%$, a najmniej właśnie dla $C_3A=4.3\%$.

Nie zgadzam się ze stwierdzeniem na str. 72, że „W normalnych warunkach eksploatacji beton pracuje pod ciśnieniem atmosferycznym i stałej temperaturze”. Moim zdaniem, ciśnienie wody jest równe atmosferycznemu jedynie na poziomie wód gruntowych w pełni nasyconym wodą elementem betonowym, a w każdej innej sytuacji ciśnienie wody jest większe (poniżej poziomu wód gruntowych) lub mniejsze (powyżej tego poziomu i w stanie niepełnego nasycenia wodą elementów betonowych). O stałej temperaturze można mówić chyba jedynie w przypadku budowli podziemnych zagłębionych kilka metrów poniżej poziomu gruntu.

Na str. 77 porównano wyniki obliczeń makroskopowego odkształcenia osiowego próbki zanurzonej w roztworze siarczanu sodu, przy założeniu, że etryngit powstaje w reakcji w roztworze. Czy wartości wszystkich parametrów przyjętych w tych obliczeniach były na tyle pewne, że upoważniałoby to stwierdzenia, że „ekspansywny etryngit powstaje istotnie w reakcji topochemicznej.”? Ponadto wartość stałej reakcji k została wyznaczona w rozdziale czwartym na podstawie znanych wyników odkształcenia, więc trudno na tej podstawie formułować tak daleko idący wniosek.

Do rozdziału szóstego nie mam zastrzeżeń merytorycznych, poza ogólną uwagą, że moim zdaniem, od początku należało sformułować model dla najbardziej ogólnego przypadku, tj. z uwzględnieniem obciążeń zewnętrznych, a ich brak (czy raczej pomijalnie małą wartość) uznać za przypadek szczególny. Trudno sobie bowiem wyobrazić element betonowy bez żadnego ob-

ciężenia zewnętrznego, choćby pochodzącego od sił grawitacji. Założenie przez Autora, że obciążenie jest ściskające wzdłuż tylko jednej z osi układu współrzędnych jest dość dużym uproszczeniem analizowanego zagadnienia, które wprawdzie bardzo ułatwiło jego rozwiązanie, ale jego przyjęcie nie zawsze jest uzasadnione.

W rozdziale siódmym, zawierającym podsumowanie i kierunki dalszych badań, Autor stwierdza, że „uzyskano dobrą zgodność z doświadczeniem”. Moim zdaniem takie stwierdzenie jest zbyt kategoryczne i raczej nieuprawnione, bo wyniki swoich obliczeń Doktorant porównał z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi przez jednego tylko badacza i dla jednego tylko parametru opisującego skutki korozji siarczanowej.

Napisanie własnego programu komputerowego do rozwiązywania dwuwymiarowego, nieliniowego zadania „dyfuzji-reakcji” metodą elementu skończonego jest niewątpliwie pewnym osiągnięciem Doktoranta, co podkreśla on w podsumowaniu pracy, ale z naukowego punktu widzenia, tak nie jest, bo podobne zagadnienia rozwiązano już wielokrotnie, a nawet można je znaleźć w podręcznikach MES.

Stwierdzenie, że „podejście mikromechaniczne do modelowania zewnętrznej korozji siarczanowej daje pełen obraz zjawiska”, w przeciwieństwie od podejścia fenomenologicznego, także uważam za nieuprawnione. Doktorant pominął w swoim modelu szereg ważnych czynników, takich jak np. wpływ zawartości wilgoci i temperatury, wpływ wytrącania się etryngitu na przepuszczalność ośrodka, adwekcyjny transport wody porowej, obecność innych jonów w wodzie porowej, wielkość i rodzaj kruszywa betonu, których uwzględnienie, jak dotychczas, jest możliwe jedynie przy zastosowaniu elementów podejścia fenomenologicznego. Zgadzam się, że dzięki opisowi mikromechanicznemu uzyskujemy pełniejszy obraz niektórych aspektów złożonych zjawisk fizykochemicznych i mechanicznych, ale wciąż jest on daleki od pełnego zrozumienia rzeczywistości fizycznej.

Powyższe uwagi krytyczne nie wpływają na moją ogólnie pozytywną ocenę pracy doktorskiej mgr inż. Węglewskiego.

5. Uwagi szczegółowe

W niniejszej części recenzji zawarłem szereg uwag o bardziej szczegółowym charakterze, głównie zauważone przeze mnie nieścisłości i drobniejsze błędy merytoryczne.

W całym tekście rozprawy Autor konsekwentnie stosuje angielskie słowo „ettringit”, na określenie „etryngitu”, które to słowo jest powszechnie stosowane w literaturze polskojęzycznej. Uważam to za niewłaściwe i niepotrzebne.

Określenie „materiały betonowe” (str. 5) jest niepoprawne i raczej niestosowane w języku polskim.

Stwierdzenie, że wypłukiwanie wodorotlenku wapnia jest przyczyną „osłabienia wiązania cementowego C-S-H” (str. 6), nie jest prawdziwe – przyczyną tego jest wyługowywanie innych związków chemicznych wapnia.

Stosowanie w kilku miejscach pracy określenia „moduły sprężyste” (np. str. 6, 9, 27, 51), zamiast „moduły sprężystości”, jest błędne. Stwierdzenie na str. 9, że zachodzi „degradacja stałych sprężystych” jest skrótem myślowym i nie powinno być stosowane.

Także określenie „ekspansja elementów konstrukcji” (str. 6, 14) jest co najmniej niezręczne językowo.

Co oznacza określenie „nasycona atmosfera” na str. 10? Czy chodzi o atmosferę, w której wilgotność względna powietrza była zbliżona do 100%, czy może chodzi o nasycenie inną substancją?

Co Autor miał na myśli mówiąc, że „...wzrost kryształu będzie akomodowany...”?

Co to są „moduły objętościowe”, o których wspomina się na str. 29?

W rozdziale trzecim, omawiającym metody mikromechaniki w opisie chemo-uszkodzenia betonu, oraz w dalszej części pracy Autor konsekwentnie stosuje nazwę „metoda wewnętrznie

zgodna” na określenie metody autokoherentnej (ang. *self-consistent*). Nazwa ta, raczej nie spotykana w literaturze polskojęzycznej, wydaje mi się dość niezręczna. Czy zdaniem Doktoranta mogą istnieć metody, które nie są wewnętrznie zgodne?

Na str. 40 powtórzono równania reakcji chemicznych (1.1a) i (1.1b), które były już podane wcześniej na str. 6. Podobna uwaga dotyczy wzorów (3.3) powtórzonych na str. 47.

Z wykresu 4.4 trudno odczytać, ze względu na zbyt dużą jego podziałkę, czy rzeczywiście „...do wywołania wzrostu mikroszczeliny potrzebne jest ciśnienie rzędu 1 GPa.”

Na str. 56 osie kartezjańskiego układu współrzędnych oznaczane są „x, y, z”, a w pozostałej części pracy „x₁, x₂, x₃”. Świadczy to o niezbyt starannej redakcji tego fragmentu tekstu.

Stwierdzenie „...wyznaczono najlepsze dopasowanie wyników...” (str. 67) jest wyjątkowo niezręczne językowo.

Na str. 68 mówi się, że wyniki „dla zawartości C₃A=7% nie wykazały tak dobrej zgodności z wynikami testów”, a nie są one w ogóle pokazane na Rysunkach 4.14 ani 4.15. Dlaczego?

W rozdziale piątym na str. 71 Autor pisze, że „reakcja będzie w równowadze...” – moim zdaniem, to substraty i produkty tej reakcji będą w równowadze termodynamicznej.

Na górze str. 85 nie wyjaśniono znaczenia symbolu COD, który występuje tu po raz pierwszy w tekście – pojawia się ono dopiero na dole tej samej strony.

Rozprawa jest na ogół starannie zredagowana (poza wymienionymi przypadkami) i napisana dość poprawną polszczyzną, choć w niektórych fragmentach, zwłaszcza powstałych na podstawie przeglądu literatury zagranicznej, można zauważyć stosowanie określeń, zwrotów i szyku zdania wzorowanych na języku angielskim. Przed ewentualną publikacją pracy w języku polskim sugeruję usunięcie usterek językowych i stylistycznych, które wymieniłem powyżej.

Doktorant popełnił też sporo błędów interpunkcyjnych, co czasami utrudnia zrozumienie jej treści. Nie ustrzegł się też szeregu błędów literowych (zaznaczonych przeze mnie w tekście rozprawy), nieprecyzyjności i usterek językowych, z których część opisałem powyżej.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Doktorant samodzielnie sformułował i rozwiązał numerycznie równania dwóch sprzężonych mikromechanicznych modeli chemo-uszkodzenia betonu, wywołanego przez zewnętrzną korozję siarczanową, przy założeniu, że zachodzi ona w wyniku krystalizacji etryngitu w reakcji topochemicznej, albo reakcji w roztworze wypełniającym pory materiału. Korzystając z opublikowanych wyników badań, zweryfikował eksperymentalnie uzyskane przez siebie wyniki. Następnie rozszerzył sformułowany uprzednio model, uwzględniając dodatkowo wpływ naprężeń, wywołanych obciążeniami zewnętrznymi, na efektywne właściwości transportowe i odkształcenia elementów betonowych, w których zachodzi krystalizacja etryngitu. Cel, jaki sobie postawił Autor pracy, został osiągnięty.

Mgr inż. Węglewski wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu podstaw teoretycznych mikromechaniki ciała stałego i zjawisk fizyko-chemicznych towarzyszących korozji siarczanowej w betonie, a także umiejętnością formułowania i rozwiązywania numerycznego modeli matematycznych tych złożonych procesów. Moim zdaniem, jego rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie interdyscyplinarnego problemu naukowego, a także wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej.

W związku z tym stwierdzam, że moim zdaniem rozprawa doktorska mgr inż. Witolda Węglewskiego spełnia wymagania „ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” oraz wnioskuje o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

