

Dr hab. inż. Zbigniew Perkowski, prof. uczelni
Politechnika Opolska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Fizyki Materiałów
Katowicka 48, 45-061 Opole
tel.: 77 449 85 57
e-mail: z.perkowski@po.edu.pl

Opole, 22.03.2021 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Faustyna Rechy pt. „*Modelowanie degradacji elementów żelbetowych w wyniku korozji zbrojenia*”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną niniejszej opinii stanowi pismo z dnia 01.02.2021 r. (l.dz. RDILT/62/2020/2021) skierowane do mnie przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej, dra hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ, z informacją o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Faustyna Rechy pt.: „*Modelowanie degradacji elementów żelbetowych w wyniku korozji zbrojenia*”. Do pisma załączono kopię pracy i druk umowy. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Tomasz Krykowski, prof. PŚ, a promotorem pomocniczym dr inż. Tomasz Jaśniok.

2. Tematyka i układ rozprawy

W ramach pracy doktorskiej autor postawił sobie do osiągnięcia następujące cele naukowe:

- 1) Rozwinięcie termomechanicznego modelu korozji stali zbrojeniowej w betonie, którą przyspieszono za pomocą elektrolizera.
- 2) Określenie zależności, która opisuje odkształcenia dystorsyjne w strefie przejściowej między stalą zbrojeniową i betonem. Odkształcenia te powstają w wyniku osadzania się produktów korozji, a ich narastanie zależne jest od natężenia prądu korozyjnego i stopnia wypełnienia produktami pustek w strefie przejściowej.
- 3) Opracowanie metody doświadczalnej, pozwalającej na wyznaczenie tzw. czasu krytycznego, w którym następuje pełne „doszczelnienie” produktami korozji pustek w strefie przejściowej i po którym następuje pęknięcie otuliny.
- 4) Opracowanie modelu komputerowego procesu korozji stali zbrojeniowej w betonie, którą przyspieszono za pomocą elektrolizera.
- 5) Weryfikacja modelu komputerowego na podstawie wyników doświadczeń laboratoryjnych i ocena jego wrażliwości metodą Monte Carlo w związku z niepewnościami wybranych parametrów.

Myślą przewodnią dysertacji jest więc głębsze poznanie przebiegu bardzo złożonego procesu, jakim jest korozja zbrojenia stalowego w konstrukcjach betonowych – zarówno od strony teoretycznej jak i badań laboratoryjnych. Do modelowania tego zjawiska autor wykorzystał metody elektrochemii i mechaniki ośrodków wieloskładnikowych z uwzględnieniem kruchych i plastycznych cech betonu. Z kolei badania doświadczalne ukierunkowano przede wszystkim na pomiary zmian wymiarów liniowych korodujących próbek w celu identyfikacji czasu krytycznego i weryfikacji modelu oraz zmiany masy prętów zbrojeniowych i natężenia prądu korozyjnego w celu kalibracji modelu.

W efekcie uzyskano interesujące wyniki naukowe, które mają znaczenie praktyczne z punktu widzenia problematyki testowania i przewidywania trwałości korodujących elementów żelbetowych – w szczególności pęknięcia otuliny betonowej w wyniku narastania rdzy wokół zbrojenia.

Rozprawa doktorska liczy 119 stron i składa się kolejno z następujących części: spisu treści, spisu ważniejszych symboli, 6 rozdziałów (łącznie z wprowadzeniem i podsumowaniem), 3 załączników i bibliografii. W pracy zamieszczono ponumerowanych: 45 rysunków, 26 tablic, 133 wzory, 4 fotografie, 89 pozycji bibliograficznych (w tym 3 normatywy i 1 rekomendację techniczną).

We rozdziale 1 (str. 10-16) przedstawiono przedmiot i cele rozprawy oraz podano uzasadnienie, dlaczego doktorant podjął się omawianej tematyki. Dokonano także przeglądu dostępnej literatury.

Rozdział 2 (str. 17-26) przybliży czytelnikowi podstawowe informacje i definicje związane z elektrochemicznym opisem korozji stali zbrojeniowej w betonie. Autor m.in. omówił równanie Nernsta, określające potencjał równowagowy elektrody żelaznej i tlenowej; pojęcie prądu korozyjnego i równoważnika elektrochemicznego żelaza; wykresy Evansa, ilustrujące wielkość nadpotencjałów elektrod; stan pasywny i depasywację stali zbrojeniowej oraz przebieg elektrolizy w układzie stal-beton. Przedstawienie tych wiadomości w tym miejscu pracy jest słuszne z uwagi na zwiększenie klarowności dalej prowadzonych wywodów.

W rozdziale 3 (str. 27-44) sformułowano model termomechaniczny degradacji betonu, która zachodzi w trakcie przyspieszonej korozji zbrojenia na skutek osadzania się rdzy w warstwie przejściowej między stalą i betonem. W tym celu doktorant wykorzystał znany z literatury model ośrodka wieloskładnikowego z dominującym komponentem (Kubik (1985)), który zastosowano także z powodzeniem do opisu korozji żelbetu (np. Zybura (1990), Krykowski (2012)). W rozważanym ośrodku materialnym autor wyróżnił jako składniki: szkielec (składnik dominujący), wodę i parę wodną (w porach szkielec) oraz substraty i produkty reakcji elektrodowych. W przypadku tak zdefiniowanej mieszaniny przedstawiono bilanse masy, pędu, krętu, energii wewnętrznej i entropii. Następnie zapostulowano aproksymację energii swobodnej, tak by w równaniu fizycznym na tensor naprężenia uwzględnić odkształcenia sprężyste i plastyczne materiału oraz odkształcenia natury dystorsyjnej od narastania produktów korozji, których prędkość uzależniono liniowo od natężenia prądu korozyjnego. Z kolei w tensorze sztywności uwzględniono degradację sprężystą betonu. Wprowadzono także potencjał dyssypacyjny w celu zdefiniowania równań ewolucji wyróżnionych parametrów wewnętrznych. Dalej autor przedstawił ważną, z punktu widzenia obranych celów pracy, analizę mechanizmów oddziaływania, które jest wywierane w formie nacisku na otulinę betonową przez produkty korozji stali. W rezultacie uwzględniono za pomocą funkcji β zmienną w czasie intensywność tego procesu spowodowaną faktem, że rdza w przestrzeni porowej i mikropęknięciach betonu oraz wżerach zbrojenia, w okresie od depasywacji stali do czasu krytycznego, ulega stopniowemu zagęszczaniu. W szczególności funkcja β moduluje w skali od 0 do 1, jak zwiększająca się objętość produktów korozji przekłada się w czasie na przyrost odkształceń dystorsyjnych matrycy cementowej. Z uwagi na warunki eksperymentu, do opisu którego zastosowano omawiany model, we wzorze na odkształcenia dystorsyjne wprowadzono tzw. obliczeniowy równoważnik elektrochemiczny. Umożliwia on przeliczenie natężenia prądu korozyjnego na masę roztwarzanej stali w jednostce czasu, która nie jest wypłukiwana z betonu. Rozdział zakończono ogólnym omówieniem zależności z zakresu mechaniki betonu, stali i kontaktu między nimi, które zaimplementowano w programie komputerowym ATENA. Autor przybliżył je z uwagi na fakt, iż wykorzystał ostatecznie ten pakiet, adaptując omawiany model teoretyczny w analizach numerycznych (rozdział 5).

Kolejne części, 4 i 5, stanowią najważniejszą część dysertacji. Rozdział 4 (str. 45-71) poświęcono opisowi doświadczeń laboratoryjnych. Wykonano 2 serie próbek betonowych na bazie cementu CEM I 32,5 N o $w/c=0,53$ z kruszywem o maksymalnej średnicy 8 mm. Kostki do badań korozyjnych w serii I i II miały odpowiednio wymiary 100 mm x 100 mm x 80 mm i 150 mm x 150 mm x 130 mm. W każdej z nich zatopiono wzdłuż krótszego boku po 1 pręcie gładkim (St3SX) o średnicy 20 mm (seria I) i 16 mm (seria II) z otuliną 3 cm. Uzupełniając wykonano z tych samych partii betonu próbki do badań wytrzymałościowych, określając klasę betonu w serii I jako C60/75, a w serii II jako C50/60. W testach korozyjnych kostki trzymano pod wodą, przykładając źródło prądu o stałym napięciu 20 V do pręta (anoda) i „koszyka” z perforowanej blachy nierdzewnej (katoda), w którym umieszczano próbkę. W ciągu okresu 622 h (seria I) i 307 h (seria II) mierzono w sposób ciągły natężenie prądu korozyjnego i opór oraz co pewne odstępy czasu zmiany szerokości próbek prostopadle do prętów i rozwarcie rys, które powstawały wzdłuż nich. Pomiarów geometrycznych wykonano za pomocą systemu