

dr hab. inż. Agnieszka Ślosarczyk, prof. PP
Instytut Budownictwa
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 5
60-965 Poznań

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Jacka Kołodzieja z Politechniki Śląskiej

pt.: *Badania skuteczności ochrony przed korozją ogniowej powłoki cynkowej na stali
zbrojeniowej w betonie*

1. Podstawa opracowania opinii

Podstawę opracowania opinii stanowią

- pismo Pana dr hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport z Politechniki Śląskiej, z dnia 31.03.2021, zlecające wykonanie opinii rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Kołodzieja, także z Politechniki Śląskiej pt.: *Badania skuteczności ochrony przed korozją ogniowej powłoki cynkowej na stali zbrojeniowej w betonie*
- umowa o dzieło nr UMC/1019/2021 do wniosku o numerze 984/UMC/RB0-3/2021 z dnia 29 marca 2021 dotycząca wykonania opinii jw., zawarta między stronami: Politechniką Śląską, reprezentowaną przez prof. dr hab. inż. Joannę Bzówkę, a dr hab. inż. Agnieszką Ślosarczyk, prof. PP.

Przygotowując opinię kierowałam się dostarczonym maszynopisem rozprawy przygotowanym przez Pana mgr inż. Jacka Kołodzieja oraz Ustawą z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. poz.1668).

2. Przedmiot, cel i zakres pracy

Recenzowana praca doktorska Pana mgr inż. Jacka Kołodzieja z Politechniki Śląskiej dotyczy możliwości wykorzystania w praktyce inżynierskiej katodowej ochrony prętów stalowych w postaci ogniowo nanoszonej warstwy cynku jako zbrojenia betonu o przedłużonej trwałości. O ile tematyka zastosowania takiego rozwiązania w budownictwie jest znana od lat i praktykowana na świecie, o tyle na terenie Polski stosowanie zbrojenia stalowego zabezpieczanego powłokami antykorozyjnymi nie jest powszechne. Zdając sobie sprawę z tych uwarunkowań Doktorant za cel swoich badań obrał „określenie poziomu ochrony stali

zbrojeniowej poprzez powłokę cynkową w porównaniu do stali pozbawionej ochrony". W tym celu wykonał badania ocynkowanej ogniowo stali zbrojeniowej zarówno w modelowej cieczy porowej betonu, jak i w betonowych elementach określając warunki wystąpienia korozji zbrojenia w środowisku odpowiadającym braku zagrożenia korozją oraz w warunkach oddziaływania chlorków. Dodatkowo przeprowadził testy przyczepności i sztywności zakotwienia ocynkowanych prętów stalowych w betonie. Wszystkie badania były prowadzone w odniesieniu do prętów stalowych bez powłoki.

Promotorem pracy doktorskiej jest Pan dr hab. inż. Mariusz Jaśniok, prof. PŚ specjalizujący się w tematyce diagnostyki i ochrony antykorozyjnej konstrukcji żelbetowych o długich tradycjach, zapoczątkowanych przez prof. dr hab. inż. Adama Zyburę. Tematyka pracy doktorskiej wpisuje się zatem jednoznacznie w naukowe zainteresowania Promotora i grupy badawczej Katedry Konstrukcji Budowlanych PŚ. Chciałabym także zaznaczyć, że Pan mgr inż. Jacek Kołodziej jest autorem i współautorem dziesięciu artykułów naukowych o zasięgu krajowym i międzynarodowym, na które powołuje się w rozprawie doktorskiej, w tym dwóch prac wysoko punktowanych (140 pkt. MEN) opublikowanych w latach 2020-2021 prezentujących wyniki badań pracy Doktoranta i Promotora, dra hab. inż. Mariusza Jaśnioka, prof. PŚ.

Maszynopis rozprawy jest zwarty i zawiera 102 strony tekstu z 69 rysunkami, 8 tabelami i 16 wzorami. Zacytowano 115 pozycji literaturowych, w tym artykuły naukowe w j. polskim i angielskim, rozdziały lub opracowania oraz akty prawne, w tym normy.

3. Omówienie rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z 9 rozdziałów: wprowadzenia, trzech rozdziałów przedstawiających przegląd literatury i czterech rozdziałów opisujących program, metodykę badań oraz wyniki badań z szeroką analizą oraz krótkiego rozdziału zawierającego podsumowanie i wnioski. Całość kończy zestawienie literatury.

Przedmiotem rozważań Doktoranta jest możliwość wytworzenia w warunkach krajowych katodowej ochrony stali w postaci ogniowej powłoki cynkowej oraz zastosowanie jej jako prętów zbrojeniowych o podwyższonej trwałości w konstrukcjach betonowych. W pierwszej części pracy, w rozdziałach 2-5, Doktorant w sposób syntetyczny przedstawił przegląd istniejącego stanu wiedzy na temat korozji zbrojenia, metod zabezpieczania zbrojenia w betonie i sposobów diagnostyki konstrukcji narażonych na działania korozyjne oraz wpływu czynników korozyjnych na zbrojenie oraz przyczepność stali ocynkowanej do betonu. Ponadto

na początku pracy w rozdziale wprowadzającym Doktorant sformułował trzy tezy, które następnie w rozdziałach 6-8 obejmujących badania własne konsekwentnie udowodnił.

Pierwsza teza dotyczy możliwości wykonania w warunkach krajowych skutecznej ochrony powłokowej prętów zbrojeniowych ze stali konstrukcyjnej metodą cynkowania ogniowego. Według Doktoranta zastosowanie tego typu rozwiązania może przyczynić się do zwiększenia trwałości konstrukcji betonowych zarówno przez zwiększenie odporności korozyjnej stali, jak i zabezpieczenie otuliny betonowej przed degradacją wynikającą z naprężeń mechanicznych wywołanych produktami korozji stali. W celu realizacji postawionej tezy Doktorant przeprowadził testy cynkowania metodą ogniową typowych konstrukcyjnych prętów stalowych, a następnie sprawdził procesy korozji zbrojenia z powłoką cynkową w roztworach o pH 12, 12,7 i 13,4 odpowiadających pH cieczy porowej betonu. Ustalił w ten sposób zakresy stosowania tego typu powłok, potwierdzając przy tym, że w wysokim pH betonu powyżej 13,4 powłoka cynkowa może ulegać znacznemu roztwarzaniu.

Kolejna teza pracy dotyczyła możliwości dwuletniej oceny trwałości powłoki cynkowej w betonie z wykorzystaniem nieinwazyjnych nowoczesnych technik elektrochemicznych. W rozdziale 7 i 8 Doktorant przedstawił wyniki badań elektrochemicznych metodą oporu polaryzacji liniowej i spektroskopii impedancyjnej dla prętów stalowych z powłoką cynkową i bez powłoki w betonie. Na podstawie tych badań określił wartości prądów korozyjnych w zależności od potencjału oraz wyznaczył krzywe rozkładów wartości gęstości prądu korozyjnego w funkcji czasu przedstawiające skuteczność ochrony powłokowej zbrojenia w betonie, zarówno w warunkach bezkorozyjnych, jak i w warunkach zagrożenia korozją chlorkową. Katodowa ochrona stali za pomocą powłoki cynkowej została również oceniona za pomocą analizy mikrostruktury połączenia stal-powłoka cynkowa metodą elektronowej mikroskopii skaningowej, a skład jakościowy i grubość powłoki określono wykorzystując analizę EDS. Badania potwierdziły skuteczność powłoki cynkowej w przeciwdziałaniu korozji stali, również w obecności chlorków.

Ostatni etap badań, przedstawiony w rozdziale 8 stanowiący trzecią tezę pracy, dotyczył oceny przyczepności ocynkowanych prętów zbrojeniowych do betonu oraz określenia sztywności ich zakotwienia. Badania prowadzono dla różnych gatunków stali (S235JR+AR i B500SP) oraz różnych średnic prętów (8 i 16 mm), zarówno gładkich jak i żebrowanych w warunkach oddziaływań korozyjnych chlorków i bez zagrożenia korozją. Stosując badanie siły wyrywającej w połączeniu z zaawansowaną analizą optyczną przebiegu destrukcji układów żelbetowych stwierdzono, że powłoka cynkowa obniża sztywność zakotwienia prętów żebrowanych w betonie o około 15%. Istotny wpływ na sztywność mają też produkty korozji

stali i cynku, przy czym mimo zdecydowanie silniejszej korozji cynku, w obu przypadkach, produkty korozji doszczelniając strukturę betonu poprawiały sztywność zakotwienia prętów w betonie.

4. Ocena pracy i uwagi

Przedmiot pracy ukierunkowano na opracowanie i wdrożenie współczesnych technik nieinwazyjnego diagnozowania konstrukcji żelbetowych wykorzystując metody elektrochemiczne w celu oceny stanu zbrojenia w postaci ocynkowanych i nieocynkowanych prętów stalowych w warunkach bezkorozyjnych i narażonych na działanie chlorków.

Analizę skuteczności zabezpieczenia stali w betonie oceniono głównie w oparciu o elektrochemiczną metodę oporu polaryzacji liniowej oraz spektroskopię impedancyjną. Badania prowadzono zarówno dla samych prętów stalowych i ocynkowanych ogniowo, jak i w/w prętów w układzie z betonem w różnych warunkach środowiskowych bez zagrożenia korozją i w warunkach korozji chlorkowej. Uzupełnienie badań elektrochemicznych stanowi ocena strefy kontaktowej na granicy zbrojenie stalowe – matryca cementowa za pomocą mikroskopu optycznego i elektronowej mikroskopii skaningowej połączonej z analizą składu pierwiastkowego produktów korozji sondą EDS. Istotne dopełnienie badań elektrochemicznych i strukturalnych stanowią badania przyczepności zbrojenia z powłoką cynkową do betonu prowadzone w kierunku wyznaczenia siły wrywającej, oceny zakotwienia prętów w betonie oraz oceny rozkładu naprężeń w badanych elementach żelbetowych wykonanych za pomocą bezdotykowego systemu rejestracji odkształceń ARAMIS, bazującego na optycznej cyfrowej korelacji obrazu.

Uzyskany zbiór danych jest imponujący, świadczący o ponadprzeciętnej pracy włożonej przez Doktoranta w uzyskanie tych wyników. Za szczególnie cenne osiągnięcie uważam:

- wyznaczenie zakresów trwałości katodowej ochrony stali w postaci powłoki cynkowej w zależności od zmieniającego się pH porowej cieczy betonu w porównaniu z prętami niezabezpieczonymi antykorozyjnie oraz określenie wpływu stężenia chlorków na trwałość powłoki cynkowej,
- monitorowanie zabezpieczenia stali ogniową powłoką cynkową w betonie w warunkach naturalnych i zagrożenia korozją chlorkową w ciągu niemal dwuletniego programu badań za pomocą metod elektrochemicznych: metody oporu polaryzacji liniowej i spektroskopii impedancyjnej oraz wyznaczenie krzywych przedstawiających zmiany potencjału korozyjnego ocynkowanego stalowego zbrojenia w betonie bez i z dodatkiem chlorków w porównaniu do prętów bez powłoki (rys. 43 i 46). Zaproponowany sposób zaawansowanej diagnostyki

konstrukcji żelbetowych może stanowić cenne uzupełnienie dotychczas stosowanych metod nieniszczących i stanowić istotny element monitorowania strategicznych obiektów budowlanych w sposób szczególnie narażonych na oddziaływania zewnętrzne,

- zbadanie wpływu powłoki cynkowej na jakość połączenia prętów stalowych gładkich i żebrowanych o średnicy 8 mm i żebrowanych o średnicy 16 mm z betonem oraz wyznaczenie sztywności zakotwienia prętów stalowych żebrowanych o średnicy 16 mm bez powłoki i z powłoką cynkową w betonie narażonym na oddziaływanie korozyjne chlorków i w przypadku braku korozji.

Proszę także o ustosunkowanie się do poniższych uwag i odpowiedzi na pytania:

- w części teoretycznej Doktorant przedstawia na rysunkach 6 i 7 schematy ogniwa korozyjnego w wyniku działania karbonatyzacji i korozji chlorkowej, w obu równaniach dla reakcji katodowej powinny być w zapisie 2 cząsteczki wody
- Doktorant, moim zdaniem nieco niefortunnie, posługuje się pojęciem syntetyczna ciecz porowa. Rzeczywiście w kilku pracach anglojęzycznych można spotkać określenie „*synthetic pore solution*”, niemniej jednak bezpośrednie tłumaczenie i stosowanie w j. polskim może mieć mylne konotacje. Tym bardziej, że Doktorant w kilku miejscach pracy, np. str. 51-52 w opisie pod rysunkami 32-34 stosuje dużo lepsze określenie „*modelowanie cieczy porowej betonu*” lub „*w roztworze modelującym ciecz porową*”. Proszę o uzasadnienie stosowania tego pojęcia przez Doktoranta. Ponadto Doktorant nie podaje w pracy składu chemicznego roztworów wodnych odpowiadających cieczy porowej betonu o pH 12, 12,7 i 13,4
- we wszystkich badaniach elektrochemicznych Doktorant podawał gęstości prądów korozyjnych w przeliczeniu na jednostkę powierzchni elektrody badanej (ocynkowany lub nieocynkowany pręt stalowy). W jaki sposób wyznaczana była powierzchnia prętów żebrowanych, czy również w tym przypadku wykonywano skan przestrzenny skanerem laserowym? O ile różniła się powierzchnia elektrody wykonanej z prętów ocynkowanych od nieocynkowanych?
- zgodnie z wnioskami Doktoranta przedstawionymi w rozdziale 7 spadek prądu korozyjnego w układach żelbetowych po 2 latach badań wynika z blokowania dostępu elektrolitu do powierzchni elektrody w wyniku powstających produktów korozyjnych. Jest to na pewno jedna z przyczyn, ale dodatkową może być zmiana odczynu pH matrycy cementowej betonu. Czy Doktorant badał zmiany pH betonu w trakcie prowadzonych badań?

W podsumowaniu pracy zabrakło propozycji badań, które mogłyby stanowić kontynuację pracy. Stąd też proszę o ustosunkowanie się do dwóch aspektów powiązanych z badanym zagadnieniem:

- w części teoretycznej Doktorant przedstawiając zagadnienia związane z trwałością stali w betonie opisuje zagadnienia związane z korozją chlorkową oraz z zagrożeniem karbonatyzacją. Oba rodzaje korozji są niezwykle niebezpieczne dla stali, szczególnie w układzie żelbetowym. Czy Doktorant rozważał badania nad rolą karbonatyzacji w kształtowaniu procesów korozyjnych badanych elementów?
- stosowanie ochrony katodowej stali ma na celu głównie podwyższenie trwałości stali w betonie, co w konsekwencji będzie prowadziło do dłuższego czasu eksploatacji konstrukcji żelbetowej. Negatywnym efektem tego rozwiązania jest jednak, co zostało szeroko omówione w rozdziale 8, pogorszenie przyczepności ocynkowanych żebrowanych prętów stalowych do betonu i obniżenie sztywności zakotwienia prętów żebrowanych o średnicy 16 mm. Z drugiej strony we współczesnym budownictwie obserwujemy szerokie stosowanie cementów z dodatkami, których skład chemiczny w sposób znaczący odbiega od cementów czystych klinkierowych, które Doktorant stosował w badanych elementach betonowych. Stosując mieszanki betonowe w oparciu o cementy z dodatkami można uzyskać lepszą przyczepność do zbrojenia i trwałość na oddziaływania czynników zewnętrznych, m.in. karbonatyzację czy korozję chlorkową. Czy zdaniem Doktoranta stosowanie tego typu cementów może wpłynąć na pH cieczy porowej betonu i zachowanie się warstwy cynkowej na stali?

Mimo tych uwag postawiony cel pracy i tezy uważam za udowodnione, a osiągnięcie to bezpośrednio rzutuje na w pełni pozytywną ocenę wyników badań przedstawionych w rozprawie doktorskiej.

5. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jacka Kołodzieja ma dobre podstawy naukowe i spodziewane szerokie możliwości aplikacyjne w budownictwie w aspekcie trwałości konstrukcji żelbetowych, co udowodniono w 7 i 8 rozdziale pracy. Stanowi samodzielnie wykonane opracowanie naukowe pod kierunkiem Promotora, przedstawiające istotne dla rozwoju inżynierii lądowej wyniki badań. Problematyka ta dotyczy możliwości zastosowania ogniowej powłoki cynkowej na prętach stalowych jako ochrony katodowej stali w betonie oraz możliwości monitorowania stanu konstrukcji zaawansowanymi nieinwazyjnymi metodami elektrochemicznymi. W przedstawionym dwuletnim programie badań układów żelbetowych

Doktorant udowodnił postawione tezy pracy uzyskując bardzo dobrą korelację pomiędzy badaniami elektrochemicznymi, mikrostrukturalnymi i mechanicznymi analizującymi postęp korozji ocynkowanych prętów stalowych w betonie w warunkach naturalnych i warunkach zagrożenia korozją chlorkową. Wyniki pracy mają charakter użytkowy i zaproponowany sposób diagnozowania stanu konstrukcji żelbetowych w oparciu o elektrochemiczne metody oporu polaryzacji liniowej i impedancji spektroskopowej może być wykorzystany dla różnych rozwiązań materiałowych, zarówno po stronie stali, jak i betonu oraz stanowi ciekawe rozszerzenie dotychczasowo stosowanych metod diagnostycznych.

O posiadaniu przez Kandydata ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa i transport świadczy umiejętność przygotowania planu i zrealizowania szeroko zakrojonych badań w stosunku do potrzeb przemysłu budowlanego oraz umiejętność pozyskania nowej wiedzy z zakresu zaawansowanych technik nieinwazyjnego diagnozowania stanu konstrukcji opartych na metodach elektrochemicznych. Kandydat posiadał także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań laboratoryjnych oraz analizy znacznej liczby uzyskanych wyników badań obejmujących zarówno zagadnienia inżynierskie, jak i fizykochemię procesów zachodzących podczas korozji stali oraz procesów zachodzących na granicy międzyfazowej zbrojenie stalowe/matryca cementowa.

Oceniając pozytywnie całość dotychczasowych dokonań Pana mgr inż. Jacka Kołodzieja oraz biorąc pod uwagę wymagania Art.187 U S T A W Y z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z dnia 30.08.2018 r., Poz. 1668) w brzmieniu:

- 1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej,*
- 2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne,*

wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Śląskiej.

