

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Klepackiego nt.: „Projektowe i organizacyjne uwarunkowania diagnostyki procesów powstawania i rozwoju pęknięć w rurociągach energetycznych”

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Okrajni

Podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii nr RM-39/2018/2019 z dnia 23.10.2018 r.

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 141 stron, a w tym: 2 strony spisu treści, 2 str. spisu oznaczeń, 4 str. spisu literatury (82 pozycje). Praca składa się z 14 rozdziałów. Rozprawa zawiera dość obszerny, dobrze udokumentowany i starannie przygotowany pod względem edytorskim materiał badawczy. W wykazie literatury są także cztery autorskie opracowania Kandydata.

We wprowadzeniu - rozdział 1, Autor charakteryzuje warunki pracy rurociągów wodnych i rurociągów parowych. Autor zwraca też uwagę na to, że „... rurociągi wody zasilającej są traktowane przez służby odpowiedzialne za zarządzanie majątkiem produkcyjnym elektrowni za mniej odpowiedzialne w cyklu produkcyjnym, niż rurociągi parowe”. Wg danych Agencji Rynku Energii S.A. za 3,9 % wszystkich przestojów w pracy systemów energetycznych odpowiadają urządzenia pomocnicze, tj. układy zasilania wodą i parą. Doktorant podkreśla również, że „... obowiązujące procedury i instrukcje diagnostyczne w większości nie uwzględniają specyfiki pracy rurociągów wody zasilającej, skupiając się przede wszystkim na rurociągach parowych”.

W rurociągach zasilających urządzenia energetyczne wodą gorącą wskutek występowania zużycia korozyjnego, z czasem dochodzi do zużycia zmęczeniowego, prowadzącego do awarii zasilania i długich (nawet do kilkudziesięciodniowych) przerw w pracy bloków energetycznych. Prowadzi do znacznych zakłóceń i strat finansowych w pracy przedsiębiorstw i instytucji.

W świetle tych uwarunkowań wybór tematu rozprawy doktorskiej uznaję za trafny z punktu widzenia badawczego, a także w pełni uzasadniony z uwagi na aspekty gospodarcze.

W rozdziale 2 (s.3 – s.38) Doktorant obszernie przedstawia dotychczasowy stan zagadnienia, odnosząc się do:

- historii badań i prac na temat pęknięcia korozyjnego;
- teoretycznych podstaw procesów korozyjnych, a w tym *korozji elektrochemicznej, tworzeniu się warstwy pasywnej na powierzchni materiałów poddanych procesom korozyjnym, mechaniki pęknięcia*;
- analizy obowiązujących metod i procedur nadzoru technicznego i eksploatacyjnego rurociągów energetycznych;
- obowiązujących wytycznych do projektowania rurociągów energetycznych.

Uwagi:

- analizując kinetykę procesu korozji, Autor na s. 19 stwierdza, że „... jony żelaza powstają w skutek rozpuszczania anody...”. Wg mnie powinno się tu użyć sformułowania „roztwarzania anody”, bowiem proces rozpuszczania zakłada jego odwracalność (np. rozpuszczanie soli, ale możliwe jest też ponownie jej wykrystalizowanie); podobnie o rozpuszczaniu warstwy tlenków pisze Doktorant na s.37

- ponadto Autor w pracy pisze „w skutek”; powinno być „wskutek” lub „na skutek”);
- odnośnie do s.22: czy całka może „posiadać swoje kryterium”? czy też wartość całki jest wyznaczana dla założonego kryterium?

Podsumowując analizę stanu badań na podstawie literatury i obszernych wytycznych dotyczących obowiązujących metod i procedur nadzoru technicznego oraz eksploatacyjnego rurociągów energetycznych, a także wytycznych do ich projektowania Doktorant stwierdza, że: „*brak jest opracowań uwzględniających pękanie korozyjne w procedurach diagnostycznych oraz projektowych*”. Problem jest tym bardziej istotny, jeśli wziąć pod uwagę, że rurociągi są poddawane złożonym obciążeniom mechanicznym i termicznym.

W świetle tych uwarunkowań, cel pracy – **rozdział 4**, tj. „... **określenie wytycznych do korekty procedur projektowych jak i diagnostycznych**” uznaję za odpowiedni. Realizacja tego celu wymaga podjęcia kilku zadań, które zostały sformułowane na s.39. **Pozytywnie oceniam ich zakres, ponieważ zadania badawcze obejmują badania laboratoryjne oraz badania w warunkach przemysłowych.**

Rozdział 5 dotyczy sformułowania **tezy pracy**. Teza (a raczej hipoteza pracy) została przedstawiona w postaci opisowej. Zawiera ona myśl przewodnią pracy, ale uważam, że powinna być sformułowana bardziej zwięźle, np.: (oczywiście jest to propozycja): *przyczyną uszkodzeń zmęczeniowych rurociągów energetycznych, poddanych zmiennym obciążeniom eksploatacyjnym, są współwystępujące błędy konstrukcyjne i procesy korozyjne.*

Rozdział 6 (s.40 – s.60) zawiera zasadniczą część badań przemysłowych. Doktorant stwierdza, że „*głównym procesem odpowiedzialnym za bezpieczeństwo eksploatacji urządzeń energetycznych, pracujących w podwyższonej temperaturze jest pękanie*”. Nie da się jednak pominąć, czy też wyeliminować procesu korozji wewnątrz rurociągu. Stąd też procesy korozji współwystępują ze zjawiskami zmęczenia i pękania materiału.

Doktorant dokumentuje i analizuje uszkodzenia - pęknięcia:

- rur w ścianach szczelnych parownika;
- kolana rury przegrzewacza pary;
- powierzchni wewnętrznej komory schładzacza;
- krawędzi otworów na powierzchni wewnętrznej walczaków;
- mostków komór przegrzewaczy pary.

Należy podkreślić, że mgr inż. F. Klepacki nie tylko zinwentaryzował występujące przypadki uszkodzeń, ale analizując je, starał się określić przyczyny ich występowania i mechanizmy im towarzyszące. **Potwierdził tym, że jest dobrze przygotowany do realizacji pracy naukowej.** Stwierdził, że istotnym czynnikiem, decydującym o powstawaniu uszkodzeń w elementach rurociągów energetycznych jest zjawisko korozji zachodzące na ich powierzchni, na której w wyniku pasywacji tworzy się warstwa tlenków żelaza. Warstwa ta ulega uszkodzeniom wskutek oddziaływania zmiennej temperatury i obciążeń mechanicznych. Dlatego też kolejnym krokiem były badania mechanicznych właściwości warstwy tlenków zawarte w **rozdziale 7**.

Doktorant zaproponował własną metodykę badań. Próby wytworzenia tlenków w warunkach laboratoryjnych okazały się nieskuteczne, dlatego materiał do badań został pobrany z rur węzownic przegrzewaczy pary kotła po długotrwałej eksploatacji. Odpowiednio przygotowane próbki zawierały tlenki żelaza oraz materiał nośny – stal.

Uwagi:

- s.61 – zdanie „... na podstawie oscyloskopu określono czas w którym następowało...” powinno być sformułowane „... za pomocą oscyloskopu zarejestrowano przebieg..., a następnie wyznaczono czas, po którym następowało...”;

- s.62 – stwierdzenie, że „... w obliczeniach numerycznych zasymulowano dokładnie taki sam proces ściskania pierścienia, którego dokładne wymiary geometryczne...” jest sformułowaniem potocznym, bowiem pisząc „dokładnie” należało podać „dokładność” odwzorowania (niepewność pomiaru).

W kolejnych próbach Doktorant poddał próbki wstępnej ocenie w odniesieniu do cech geometrycznych, badań metalograficznych, składu chemicznego oraz twardości. Wyniki tych badań zostały ujęte w tab. 5 – tab.11 oraz na rys.42 – rys. 44. Następnie za pomocą testu ściskania próbek pierścieniowych oraz obliczeń metodą kolejnych przybliżeń określił średnią wartość modułu Younga badanych rur na poziomie ok. 200 GPa.

Uwaga: w tego rodzaju badaniach należałoby podawać np. wartość średnią i odchylenie standardowe wyników pomiarów.

Interesujące są wyniki badań warstwy tlenków powstałych na wewnętrznych powierzchniach rur w wyniku procesu eksploatacji. Badania te obejmowały: ocenę wizualną za pomocą mikroskopu optycznego, analizę składu chemicznego w głąb warstwy oraz analizę struktury (składu fazowego) tlenków. Wyniki tych analiz (s.70 – s.75) zostały odpowiednio udokumentowane i skomentowane przez Autora rozprawy. Potwierdził tym samym, że zaproponowana przez Niego metodyka badawcza została trafnie dobrana.

Oryginalną częścią rozprawy jest doświadczalne określenie mechanicznych właściwości warstwy tlenków żelaza (s.76 – s.83). Wyselekcjonowane próbki do badań w postaci pierścieni z warstwą tlenków zostały przedstawione na rys.55. Doktorant zwrócił uwagę na trudności i brak tego typu badań w odniesieniu do tlenków metali. Wyniki pomiarów zostały ujęte w tab.15 – tab.16 oraz na rys.57 – rys.61. Wykonane badania dały podstawę do oszacowania modułu Younga warstwy tlenków żelaza.

Z uznaniem przyjmuję stwierdzenie Doktoranta, że „... wartości te należy traktować jako przybliżone zarówno z uwagi na niedoskonałości metody badań jak i ze względu na niejednorodność rozpatrywanych próbek”, bowiem **krytycyzm w odniesieniu do wyników własnych badań świadczy o rzetelności naukowej mgr. inż. Filipa Klepackiego.**

Wyniki badań laboratoryjnych właściwości warstwy tlenków zostały wykorzystane do analizy przyczyn powstawania i propagacji pęknięć pojawiających się na granicy warstwa tlenków- podłoża. Doktorant przedstawił przykład wyznaczania naprężeń w rurze z wewnętrzną warstwą tlenków w warunkach ustalonej pracy urządzenia.

Do obliczeń założył wartości statych materiałowych (moduł Younga, współczynnik rozszerzalności cieplnej) w odniesieniu do rury o średnicy wewnętrznej 40 mm, grubości ścianki 5 mm z warstwą tlenków o grubości 0,2 mm. Przyjęte wartości parametrów pracy, to.: ciśnienie 18 MPa; temperatura 350 °C; moduł Younga stali (rury) 205 GPa; moduł Younga warstwy tlenków 40 GPa; współczynnik rozszerzalności cieplnej stali $0,117 \times 10^{-4}$ 1/K; współczynnik rozszerzalności cieplnej warstwy tlenków $0,78 \times 10^{-5}$ 1/K. Rozkład naprężeń w rurze w wybranej chwili czasu został wyznaczony metodą elementów skończonych przy użyciu programu firmy Algor. Wyniki badań i analiz zostały przedstawione na rys.62 – rys.65. Analizując te wyniki Doktorant zauważa, że „... niewykluczone jest odpajanie się tlenku od podłoża, co jest częstym przypadkiem uszkodzenia warstwy tlenków w przegrzewaczach przy częstych zmianach obciążenia kotłów energetycznych”. Może to być spowodowane między innymi znaczną różnicą pomiędzy naprężeniami w warstwie tlenków i w podłożu.

W rozdziale 9 Doktorant przedstawił wyniki badań przyczyn uszkodzenia wybranego odcinka rurociągu w elektrowni (s.86 – s.93). Uszkodzenie dotyczyło kolana w części od wymiennika regeneracyjnego do pomp głównych. W wyniku tego uszkodzenia nastąpiło rozerwanie rurociągu z przemieszczeniem części rurociągu z jego złamaniem. Nastąpiło także przerwanie rurociągu pary

technologicznej w wyniku uderzenia oraz uszkodzenie instalacji elektrycznej. Umieszczenie tych awarii Doktorant przedstawił na rys.68, a ich skutki na rys.69 i rys.70. W celu wyjaśnienia przyczyny awarii zostały wykonane kompleksowe analizy obejmujące badania: *magnetyczno-proszkowe, ultradźwiękowe; pomiary grubości ścianek i owalizacji*. Ze zniszczonego kolana (rys.71 – ry.73) zostały pobrane próbki do badań: *wizualnych, składu chemicznego, metalograficznych, udarności, twardości*.

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że przyczyną rozerwania kolana była jego znaczna owalizacja, a więc błędy wykonania. Bezpośrednią przyczyną osiowych pęknięć powierzchni wewnętrznej było zmęczenie korozyjne.

W celu poznania istoty i wyjaśnienia przyczyn zaistniałej awarii Doktorant podjął badania – **rozdział 10**, wpływu owalizacji kolana na stan naprężeń na powierzchni wewnętrznej, wywołanych obciążeniami w czasie eksploatacji rurociągów. Wykonał stosowne obliczenia numeryczne przy założonych warunkach brzegowych (rys.75) i przyjętym modelu kolana (przykład rys.76). Wyniki obliczeń zostały zobrazowane graficznie (rys.77 – rys.80) oraz zestawione w tab.17. Na podstawie tych analiz zostały opracowane wykresy spiętrzenia naprężeń obwodowych (rys.81 – rys.84), które potwierdzają występowanie obszaru, w którym te naprężenia osiągają maksimum. Podobnie Autor rozprawy wykazał, że wartości naprężeń zależą także od promienia gięcia kolana, którego skutkiem jest także owalizacja.

W celu weryfikacji przeprowadzonych obliczeń i analiz Doktorant wykonał sprawdzające obliczenia wytrzymałościowe rurociągów uwzględniające owalizację – **rozdział 11**, na przykładzie dwóch bloków energetycznych klasy 120 MW (należy dodać, że układ rurociągów wody zasilającej na bloku nr 2 był podobny do rurociągu, który uległ awarii). Schematy bloków zostały przedstawione rys.87 – rys.89. Na bloku nr 1 zostały wykonane, podobnie jak wcześniej wymienione, badania nieniszczące rurociągu, a następnie Doktorant wykonał obliczenia numeryczne oddzielnie dla dwóch analizowanych rurociągów. Rozkłady naprężeń obwodowych, osiowych i zredukowanych zostały przedstawione odpowiednio na rys. 90. rys.97 oraz w tab.18 i tab.19.

Ważnym wnioskiem z tej analizy jest stwierdzenie, że „... *naprężenia zredukowane po uwzględnieniu spiętrzenia naprężenia obwodowego wskutek owalizacji w niektórych przypadkach przewyższają nawet dwukrotnie naprężenia zredukowane bez uwzględnienia owalizacji*” (rys.98 – rys.100).

W podsumowaniu tej części **rozprawy – rozdział 12**, Doktorant zaproponował, aby w miejsce dwóch pojęć, t.: *zmęczenia korozyjnego* oraz *korozji zmęczeniowej* wprowadzić jedno sformułowanie „**pękanie korozyjne**”.

Uwaga: pamiętając co kryje się pod tym pojęciem, należy też zwrócić uwagę, że pękanie korozyjne może następować w wyniku procesów korozyjnych w połączeniu z przekroczeniem wytrzymałości doraźnej, a nie tylko zmęczeniowej.

W ramach badań przemysłowych Doktorant scharakteryzował poszczególne przypadki uszkodzeń zaistniałych wskutek pęknięcia korozyjnego, poddając badaniom uszkodzenia:

- ścian szczelnych (ekranów) kotłów;
- kolana przegrzewacza pary;
- komory schładzacza;
- pęknięcia na krawędziach otworów w trefie wodnej walczaka;
- komory przegrzewacza.

Należy podkreślić, że Doktorant w każdym przypadku starał się wyjaśnić bezpośrednią przyczynę zaistniałych uszkodzeń poprzez analizę zjawisk fizycznych i chemicznych.

Przeprowadził również badania odpowiednio przygotowanych, wyciętych z rur, próbek z warstwą tlenków żelaza. Stwierdził, że: „... *po długotrwałej eksploatacji nie zmienił się moduł Younga*

(wynosi on ok. 200 GPa), ... warstwy tlenków żelaza po grubości można podzielić na cztery warstwy różniące się między sobą gęstością oraz zawartością pierwiastków nie wynikających z procesu utleniania stali, ... pierwiastki nie pochodzące ze stali, takie jak S czy Cu koncentrują się blisko powierzchni pod warstwą tlenków żelaza, natomiast Mo, który jest pierwiastkiem pochodzącym z metalu koncentruje się na zewnętrznej powierzchni warstwy tlenków" ...

Szczegółowo przeanalizował uszkodzenie rurociągu wody zasilającej bloku klasy 1200 MW. Uszkodzeniu uległo kolano o kącie 45°, co spowodowało znaczne straty w elektrowni. Stwierdził także występowanie kolejnych pęknięć w strefach obojętnych gięcia, gdzie przyczyną powstania osiowych pęknięć był zmęczenie korozyjne.

Korzystając z metody MES i programu Algor Autor rozprawy wykonał obliczenia dla kilku wariantów geometrii kolana (owalizacji, promieni gięcia, średnic i grubości ścianek). Wykazał znaczący wpływ geometrii kolana na obszary występowania i wartości naprężeń obwodowych. **Na podstawie wyników tych badań stwierdził, że: „dla rozpatrywanego rurociągu, jako kryterium powstawania uszkodzeń można przyjąć naprężenia obwodowe na poziomie 220 MPa. Wartość tę można by stosować do oceny wytrzymałości kolana z uwzględnieniem ich owalizacji”.**

W końcowym rozdziale 13 mgr inż. Filip Klepacki zaproponował nowe dodatkowe procedury do projektowania oraz diagnostyki rurociągów wody zasilającej w elektrowniach. Podał procedurę i odpowiednie zależności do obliczeń wytrzymałościowych. Przedstawił algorytm postępowania podczas badań diagnostycznych rurociągów energetycznych (rys.106). Mając świadomość, że każde poszerzenie analiz (obliczeń konstrukcyjnych, czy też diagnostyki) wymaga pewnych nakładów finansowych, na konkretnym przykładzie wybranego rurociągu przedstawił przykład analizy ekonomicznej kosztów diagnostyki oraz efektów modyfikacji metody projektowania. Te analizy mogą być wykorzystane (a ja uważam, że powinny) do „... opracowania macierzy ryzyka uwzględniającej konsekwencje i prawdopodobieństwo uszkodzenia.

W rozdziale 14 Doktorant przedstawił **14 wniosków** będących wynikiem wykonanych badań symulacyjnych oraz badań na obiektach przemysłowych. Wnioski te dotyczą efektów poznawczych i aplikacyjnych.

W analizie rozprawy doktorskiej starałem się w skrótowy sposób scharakteryzować kolejne kroki, które podjął Doktorant w celu rozwiązania postawionego problemu badawczego. Uważam, że Doktorant rzeczowo dokonał analizy zagadnienia na podstawie dobrze dobranej, reprezentatywnej literatury. Podsumowując przedstawioną rozprawę doktorską **stwierdzam, że mgr inż. Filip Klepacki wykazał, iż opanował na wymaganym poziomie umiejętność analizy i syntezy złożonych problemów badawczych, a tym samym potwierdził odpowiednie przygotowanie do pracy naukowej.**

Zaproponowaną koncepcję badań oceniam jednoznacznie pozytywnie.

Za oryginalny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny Inżynieria Produkcji uznaję:

- opracowanie metody badawczej oceny stanu technicznego rurociągów energetycznych;
- określenie współczynnika spiętrzenia naprężeń, który może zastosowany w zmodyfikowanej procedurze diagnostycznej oceny stanu kolana rurociągów energetycznych po wieloletniej ich eksploatacji;
- opracowanie algorytmu badań diagnostycznych rurociągów energetycznych;
- opracowanie przykładu analizy ekonomicznej wprowadzenia zaproponowanych zmian w projektowaniu i diagnostyce rurociągów.

To skrótowe przedstawienie zakresu wykonanych eksperymentów przez mgr. inż. Filipa Klepackiego i uzyskane wyniki upoważniają do wyrażenia opinii, że Jego wiedza i umiejętności prowadzenia badań oraz rozwiązywania złożonych problemów naukowych i inżynierskich, z ich ukierunkowaniem na przemysłowe zastosowania, są na wymaganym poziomie.

Pewnym mankamentem strony edycyjnej jest brak w wielu miejscach odpowiedniej interpunkcji.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie**, albowiem zawiera ona merytoryczną analizę stanu dotychczasowych badań oraz autorską propozycję rozwiązania postawionego problemu badawczego.

O odpowiednim przygotowaniu Autora rozprawy do prowadzenia prac badawczych świadczy właściwe zastosowanie wiedzy z zakresu planowania i organizacji badań, umiejętne korzystanie z technologii informacyjnych i na wysokim poziomie opracowanie wyników badań.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do ważnego i dotychczas nie w pełni poznanego obszaru badawczego, związanego z bezpieczną eksploatacją rurociągów energetycznych i organizacją nadzorowania ich stanu. Mgr inż. Filip Klepacki opanował na wymaganym poziomie współczesne metody organizacji badań i właściwe dla nich narzędzia, służące do rozwiązywania złożonych, wielowariantowych problemów badawczych. **Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie Inżynieria Produkcji, posiada oryginalne cechy nowości i co szczególnie istotne także możliwości zastosowań przemysłowych.**

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgra inż. Filipa Klepackiego nt.: „Projektowe i organizacyjne uwarunkowania diagnostyki procesów powstawania i rozwoju pęknięć w rurociągach energetycznych”** spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (*ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. wraz z późniejszymi, aktualnymi rozporządzeniami*) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Kraków, dnia 27 listopada 2018 r.

