

Prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski
Katedra Nauki o Materiałach
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
ul. Żwirki i Wigury 4, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 20 grudnia 2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dariusza MĘŻYKA
pt.: „*Połączenie metody Mathara i cyfrowej korelacji obrazu (DIC) jako narzędzie precyzyjnego opisu naprężeń własnych w materiałach rurociągów*”. Podstawa opracowania recenzji – pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej z dnia 15 listopada 2023 r.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Dariusza Mężyka pt.: „*Połączenie metody Mathara i cyfrowej korelacji obrazu (DIC) jako narzędzie precyzyjnego opisu naprężeń własnych w materiałach rurociągów*” stanowi obszernie opracowanie scharakteryzowanych zagadnień badawczych uściślonych w jej tytule. Dotyczy opracowania metodyki realizacji badań stanowiących podstawę do analizy stanu naprężeń własnych w elementach instalacji energetycznych pracujących w warunkach oddziaływania dużego natężenia przepływu cieczy lub gazu oraz wysokiej temperatury. Określenie stanu naprężeń własnych materiałów instalacji energetycznych w funkcji czasu jest podstawą do ustalenia kinetyki zmiany ich wartości i jednocześnie przyjęcia jako kryterium w ocenie stanu degradacji składników fazowych ich mikrostruktury – zwykle różnych gatunków stali. Determinują właściwości mechaniczne i użytkowe materiałów i stanowią przesłanie do ustalenia ich zdolności eksploatacyjnej i wyznaczenia czasu ich pracy.

Zagadnienia badawcze scharakteryzowane w opiniowanej rozprawie związane są z eksploatacją oraz trwałością urządzeń i instalacji przemysłowych szczególnie w obszarze energetyki. Współcześnie bowiem dąży się do poprawy wydajności instalacji energetycznych, także cechujących ich procesów technologicznych, najczęściej przez podwyższenie wartości parametrów ich pracy, m.in.: temperatury, ciśnienia, czasu, natężenia przepływu czynników. Osiągają obecnie wartości dotychczas uznawane za krytyczne. Jednocześnie energetyka w 21. wieku od 2 dziesiątek lat ulega szczególnie intensywnej restrukturyzacji. Występuje także tendencja do ciągłej modernizacji

i poprawy zarówno sprawności, jak również i wydajności dotychczasowych instalacji energetycznych użytkowanych często od kilkudziesięciu lat, także więc określania stanu degradacji składników mikrostruktury ich materiałów. Stąd konieczność ciągłej kontroli stanu materiałów instalacji energetycznych. Wnoszone więc są ciągle nowe zagadnienia naukowo-badawcze dotyczące opracowaniu zarówno nowych metod badań stanu degradacji materiału instalacji energetycznych, jak również kryteriów ich oceny i prognozowania czasu dalszej eksploatacji. Analiza danych literaturowych wskazuje na ograniczone przekazywanie rezultatów prowadzonych badań doświadczalnych szczególnie w ustaleniu synergii oddziaływania czynników materiałowych i technologii eksploatacji rurociągów energetycznych na stan występujących naprężeń własnych w funkcji oddziaływania zmiennych obciążeń i wysokiej temperatury oraz czasu i środowiska. Stąd w mojej ocenie zagadnienia naukowo-badawcze podjęte w opinio-
wanej rozprawie doktorskiej są aktualne w obszarze inżynierii materiałowej i w pełni uzasadnione.

Ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Dariusza Mężyka pt.: *„Połączenie metody Mathara i cyfrowej korelacji obrazu (DIC) jako narzędzie precyzyjnego opisu naprężeń własnych w materiałach rurociągów”* dotyczy opracowania metodyki realizacji pomiarów naprężeń własnych występujących w elementach krytycznych rurociągów energetycznych z zastosowaniem metody Mathara i cyfrowej korelacji obrazu. Także wykazania możliwości wprowadzenia opracowanej metodyki do oceny stopnia degradacji materiałów instalacji energetycznych pracujących w warunkach reologicznych – pełzania (naprężenie, temperatura, czas).

Elementy instalacji w energetyce w kolejnych etapach ich eksploatacji poddawane są oddziaływaniu złożonych warunków termodynamicznych (rozruch instalacji, przerwy oraz praca w stanach nieustalonych obciążeń cieplnych i mechanicznych). Stąd również narażone są na pracę w złożonym stanie naprężeń i odkształceń. Stwierdzam, że w przedstawionej do recenzji rozprawie, uwzględniono dotychczasowy stan zagadnień w zakresie metodyki oceny stopnia degradacji materiałów konstrukcji pracujących w warunkach pełzania, także dotyczące „zagadnienia odwrotnego” – prognozowania czasu pracy instalacji eksploatowanych od wielu – kilkunastu czy kilkudziesięciu lat. Wymaga więc określenia stanu technicznego i podjęcia decyzji o możliwości określenia wydłużenia czasu bezpiecznej eksploatacji całych instalacji bądź ich fragmentów pracujących w warunkach krytycznych. Uwzględniono w stosowanych metodach badań dla wyznaczenia stanu naprężeń własnych synergii charakterystycznych dla nich wyników realizowanych pomiarów. Prawdłowo została wprowadzona do oceny stanu naprężeń własnych występujących w elementach instalacji energetycznych stanowiących podstawę ustalenia czasu prognozowanej ich eksploatacji.

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dariusza Mężyka (str. 142) podzielona jest na 7 rozdziałów i załącznik. Uzupełniona jest streszczeniem rozprawy w języku polskim i angielskim oraz wykazem literatury (44 pozycje). Zawiera (wraz z załącznikiem) rysunków – 68 i tablic – 17. Rozprawa została przygotowana w formie tradycyjnej – przedstawiono krótki przegląd piśmiennictwa z obszaru jej tematyki, sformułowano tezę oraz zakres i cel realizowanych zadań badawczych. Scharakteryzowano następnie i poddano analizie uzyskane wyniki badań, przeprowadzono walidację metody oraz dokonano podsumowania i sformułowano wnioski.

Wprowadzenie do zagadnień omawianych w rozprawie doktorskiej zawarto w rozdziałach 1. i 2. odpowiednio *Wprowadzenie* i *Studium literatury*. Przedstawiono główny problem charakteryzowania stanu naprężeń własnych występujących w materiałach elementów konstrukcji. Wyodrębniono w klasyfikacji grupy naprężeń w zależności od objętości materiału przyjętego do analizy – mikro- i makronaprężenia. Wykazano główne cechy rurociągów występujących w energetyce: pary pierwotnej, pary wtórnie przegrzanej i pary do wtórnego nagrzewania. Główne zagadnienia o charakterze poznawczym i aplikacyjnym rozprawy przedstawiono w rozdziale 2. (*Studium literatury*). Omówiono ogólną charakterystykę pomiaru naprężeń własnych. Również na dużym poziomie ogólności wykazano cechy charakterystyczne metod najczęściej stosowanych do określenia naprężeń własnych, m.in. elastometrycznej, dyfrakcji elektronów i neutronów, ultradźwiękowej i magnetycznej. Także opisano metody optyczne do określenia pola odkształceń materiałów, m.in. interferometrii Moiré'a, elektronicznej interferometrii plamkowej i cyfrowej korelacji obrazu oraz metodę Mathara. Dokonano ograniczonej charakteryzacji metody Mathara i cyfrowej korelacji obrazu ze wskazaniem na możliwość ich zastosowania w określaniu stanu naprężeń własnych w rurociągach energetycznych. Wyodrębnienie ich cech charakterystycznych stanowiło podstawę przedstawienia problemu badawczego i celu rozprawy, także odniesienia do analizy wyników badań własnych.

W rozdziale 3. *Stan zagadnienia* odniesiono się do wykazanych w analizie danych literaturowych zagadnień badawczych dotyczących inicjacji i rozwoju uszkodzeń elementów krytycznych kotłów i rurociągów parowych. Omówiono, na podstawie wyników wieloletnich badań, czynniki materiałowe, technologiczne i konstrukcyjne oddziałujące na stan naprężeń i ich dopuszczalny poziom. Przedstawiono założenia do prowadzonych badań – zakres i cele rozprawy oraz sformułowano tezę, że *naprężenia własne można wyznaczyć z dokładnością wymaganą do diagnostyki konstrukcji przemysłowych przy zastosowaniu pomiarów półtrepanacyjnych metodą korelacji obrazu*.

Stwierdzam w ocenie tej części rozprawy poprawne zdefiniowanie celu naukowego, jak również poprawne przyjęcie metod badawczych dla wyznaczenia poziomu naprężeń własnych.

W rozdziale 4. *Badania własne* przedstawiono wyniki badań własnych. Omówiono podstawy przyjęte do opracowania nieniszczącej metody badań stanu naprężeń materiałów – gatunków stali stosowanych na instalacje pary w energetyce. Ustalono zakres modyfikacji metody Mathara – wprowadzono analizę numeryczną stanu naprężeń metodą MES oraz pomiary przemieszczeń – stan odkształceń – metodą cyfrowej korelacji obrazu DIC. Scharakteryzowano warunki procesu walidacji opracowanej, zmodyfikowanej metody wyznaczania stanu naprężeń DIC 3D. Prowadzono obliczenia metodą MES dla ustalenia poziomu naprężeń i odkształceń dla elementów rury o wymiarach $\varnothing 327 \times 387$ mm (stosowanych najczęściej w energetyce) oraz dla warunków rzeczywistych ich pracy: ciśnienie – 18 MPa i temperatura – 540°C. Wykonano także analizę numeryczną dla płyty płaskiej o wymiarach 400×400×6 mm podanej obciążeniu zginającemu. Uzyskane wyniki stanowiły wskazania do realizacji doświadczalnych badań weryfikujących. Proces walidacji procedury dla opracowanej zmodyfikowanej metody DIC 3D i oceny możliwości jej wprowadzenia do przemysłu wykonano dla próbek płaskich (obciążenie rozciągające i zginające) oraz rurowych (obciążenie ściskające). Wykazano pełną przydatność stosowanych metod do określania naprężeń własnych – wartości i kierunki wyznaczonych składowych naprężenia.

W rozdziale 6. *Badania stanu naprężeń własnych w elementach rzeczywistych obiektów* przedstawiono i scharakteryzowano próbę określenia składowych naprężenia w elementach rurociągów ze stali P91(X10CrMoVNb 9-1) w elektrowni Bełchatów. Czas pracy rurociągu w instalacji – 96 tys. h przy ciśnieniu pary – 18 MPa i temperaturze – 600°C. Opracowano projekt stanowiska badawczego i wykonano konstrukcję rusztowania dla aparatury stanowiska badawczego.

Analiza treści rozdz. 3÷6 pozwala stwierdzić, że zdefiniowano poprawnie problem naukowy i technologiczny oraz określono podstawowe narzędzia i metody badawcze do ich rozwiązania. Spełnione zostały warunki formalne dotyczące pracy naukowej kwalifikowanej, w tym przypadku rozprawy doktorskiej. Wszystkie istotne parametry realizacji badań eksperymentalnych Doktorant opisał i przedstawił w sposób przejrzysty – dodatkowe wykresy uzupełnił i wykazał w Załączniku. Uznaję, że mgr inż. Dariusz Mężyk potwierdził swoje umiejętności i wykazał dyscyplinę w realizacji szerokiego zakresu badań oraz systematyzowania kolejnych działań prowadzonych do zaplanowanego ich celu. Niewątpliwie Doktorant wykorzystuje swoje doświadczenie uzyskane w wieloletniej pracy w przemyśle. Walorem prowadzonych badań jest duża ich skrupulatność i dążenie do uzyskania maksymalnej liczby informacji w zakresie rozwiązania zadania badawczego. W efekcie zgromadzono wyjątkowo duży zestaw wyników badań. Podkreślić należy, że ich wiarygodność, również opracowanej metodyki pomiarów, potwierdzono w procesie walidacji wyników zmodyfikowanej metody pomiaru naprężeń własnych. Jest to wciąż niezwykle rzadkie podsumowanie uzyskanych wyników badań. Stanowi podstawę jej wprowadzenia do przemysłu. Jest to jednocześnie

cecha wyróżniająca i dodatnia dla recenzowanej rozprawy doktorskiej. W rezultacie rzetelne przedstawienie wyników badań i przeprowadzenie procedury walidacji, także wykonanie analizy porównawczej wzbogaconej dużym doświadczeniem w praktyce przemysłowej prowadzi mgr. inż. Dariusza Mężyka do sformułowania wniosków poprawnych i adekwatnych dla uzyskanych wyników. Stanowią w swej istocie świadectwo rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w tezie rozprawy (Rozdz. 7. *Podsumowanie wyników badań i wnioski*).

Niektóre poglądy i sposób ich formułowania zaprezentowane przez Doktoranta budzą w mojej opinii pewne wątpliwości. Przyjmuję jednak, że w niektórych przypadkach, w sposób uprawniony sięgnął po określone sformułowania i ustalone poglądy obecne współcześnie dość powszechnie w literaturze przedmiotu lub rozpowszechniane również w określonym środowisku naukowym wyjątkowo szeroko. Trudno więc czynić duży zarzut Doktorantowi realizującemu badania i pogłębiającego swoją wiedzę w środowisku przyjmującym ustalone zasady i terminologię. Usterki zauważone zaznaczyłem w tekście rozprawy i przekazałem mgr. inż. Dariuszowi Mężykowi do ich zastosowania w rozwiązaniach przyszłych zagadnień badawczych.

Podsumowanie oceny rozprawy i wniosek końcowy

Stwierdzam w podsumowaniu, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Dariusza Mężyka pt.: „*Połączenie metody Mathara i cyfrowej korelacji obrazu (DIC) jako narzędzie precyzyjnego opisu naprężeń własnych w materiałach rurociągów*” stanowi znaczące osiągnięcie o charakterze poznawczym, a przede wszystkim jest osiągnięciem technologicznym wdrożonym do przemysłu. Wnosi wiele informacji w zakresie doboru kryteriów oceny stopnia degradacji materiałów, ze szczególnym uwzględnieniem metodyki pomiaru naprężeń własnych w elementach instalacji energetycznych w określonych warunkach pracy. Stanowią one jednocześnie podstawę prognozowania kolejnego etapu eksploatacji w ustalonych warunkach obciążenia, temperatury, czasu i środowiska. Samodzielność Doktoranta w rozwiązaniu przyjętych zagadnień badawczych nie budzi wątpliwości i jest wzbogacona dużym doświadczeniem pracy w przemyśle.

Mając na uwadze wskazane czynniki stwierdzam, że w mojej opinii przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wszystkie kryteria wymagane przez Ustawę. Wykazane osiągnięcie naukowe stanowi interdyscyplinarne opracowanie zagadnień określonych w celu rozprawy i ma cechy nowości w zakresie metody pomiarów i określania poziomu naprężeń własnych. Uzyskane rezultaty wymagały zrealizowania założonych i szeroko rozbudowanych zadań badawczych oraz wnikliwej analizy uzyskanych ich wyników. Stąd mój wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Dariusza Mężyka do publicznej jej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.