

Warszawa, dn. 31.05.2021

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowalewski
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
02-106 Warszawa, ul. Pawińskiego 5B

RECENZJA

**poprawionej wersji rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Jasińskiego
pt.
Diagnostyka stopnia wypracowania łopatek części wysokoprężnej wirnika
turbiny 13K225 metodą magneto-indukcyjną**

wykonana na wniosek Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej w
Gliwicach z dnia 28 kwietnia 2021 roku

1. Treść i zakres rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Jasińskiego dotyczy zagadnień związanych z analizą stopnia uszkodzenia materiałów wykorzystywanych w podzespołach konstrukcji pracujących w przemyśle energetycznym, ze szczególnym naciskiem położonym na wirniki turbin parowych. Doktorant jako główny cel swojej rozprawy zaproponował zbadanie skuteczności i przydatności metody magneto-indukcyjnej jako alternatywy dla wielu innych metod nieniszczących służących do diagnostyki stanu wyeksploatowania łopatek turbin parowych pracujących w elektrowniach lub elektrociepłowniach.

Skorygowana wersja pracy podzielona została na siedem rozdziałów, zawierających łącznie 107 rysunków, spis treści, wykaz literatury obejmujący 126 pozycji, spis oznaczeń oraz streszczenie w języku polskim. Łącznie zmodyfikowana rozprawa liczy 133 strony.

W rozdziale pierwszym przedstawiono problematykę eksploatacji wirników turbin parowych oraz omówiono wybrane metody diagnostyczne wykorzystywane do identyfikacji stopnia wyeksploatowania materiałów zastosowanych w odpowiedzialnych elementach konstrukcyjnych wirników turbin. Ponadto, Doktorant skupił również uwagę na metodach magneto-indukcyjnych i wskazał je jako potencjalnie gwarantujące skuteczniejsze wykrywanie miejsc powstawania nieciągłości, względnie innych wad powstających podczas eksploatacji, niż wiele innych technik NDT.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 09 CZE 2021

nr 86/D/006/zat.

20 20 / 20 21

W rozdziale drugim Doktorant sformułował cel i zakres rozprawy oraz scharakteryzował podstawy diagnostyki i narzędzi wykorzystywanych w swoich rozważaniach. Niestety, pomimo mojej uwagi z poprzedniej recenzji, nie postawił wyraźnej tezy pracy.

Rozdział trzeci prezentuje opis materiału badawczego oraz metodyki jego doboru do badań, natomiast w czwartym opisano stanowisko badawcze.

Rozdziały piąty i szósty przedstawiają odpowiednio wyniki badań uzyskane przez Doktoranta i ich analizę. Z kolei w rozdziale siódmym Doktorant zaprezentował podsumowanie swoich rozważań z wyszczególnieniem głównych osiągnięć pracy oraz wskazał potrzebę dalszych badań w kierunku udoskonalania metod wykrywania defektów powstających w materiałach długotrwale eksploatowanych.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Jak już wspomniałem w pierwszej recenzji doktoratu mgr. inż. Tomasza Jasińskiego, tematyka rozprawy porusza zagadnienia o ogromnym znaczeniu z punktu widzenia aktualnych potrzeb energetyki. Problem zwiększenia skuteczności wykrywania defektów w elementach konstrukcyjnych turbin należy niewątpliwie do bardzo ambitnych zadań zarówno od strony teoretycznej, jak i doświadczalnej. Niemal każda taka praca, stanowiąc nową bazę wyników doświadczalnych, daje nadzieję na usprawnienie procesu przewidywania długotrwałości resursów i odpowiednio wczesnego reagowania na pojawiające się zagrożenia w miejscach szczególnie odpowiedzialnych za pracę systemów energetycznych. Pomimo wielu prowadzonych już od dawna programów badawczych, w dalszym ciągu istnieje konieczność prowadzenia kolejnych badań zarówno o charakterze teoretycznym, jak i doświadczalnym w celu rozpoznania optymalnych właściwości gwarantujących bezpieczną, a jednocześnie długotrwałą eksploatację konstrukcji, w których stale energetyczne znalazły swoje zastosowanie. Z tego względu rozprawę Doktoranta trzeba uznać za wartościową, szczególnie z uwagi na fakt opracowania nieco bardziej efektywnych technik testowania w kierunku wczesnego wykrywania wszelkiego rodzaju wad materiałowych i defektów eksploatacyjnych zagrażających bezpieczeństwu pracy całych systemów energetycznych.

W swojej poprzedniej opinii zwracałem uwagę na fakt, że pomimo trafności wyboru tematyki i ciekawych wyników, rozprawa zawierała cały szereg uchybień, nieścisłości oraz bardzo słabo była napisana od strony wydawniczej. Muszę przyznać, że skorygowana wersja doktoratu wygląda istotnie lepiej. Wiele mankamentów zostało usuniętych, zwłaszcza poziom

strony wydawniczej rozprawy został znacznie podniesiony i moim zdaniem spełnia wymagania, jakie Ustawa stawia w tym względzie pracom doktorskim.

W pierwszej kolejności chciałbym zwrócić uwagę na istotną poprawę struktury pracy, ponieważ właśnie od tej strony w poprzedniej wersji rozprawy panował duży bałagan. W aktualnej wersji mamy przejrzystą, dobrze dobraną kolejność rozdziałów, które mają zrównoważony charakter pod względem objętości.

Zgodnie z moją sugestią w pierwszej recenzji, Doktorant wprowadził jeden rozdział, który ilustruje wszystkie wyniki uzyskane w zaplanowanym programie badawczym, a po nim bezpośrednio umieścił rozdział ujmujący przeprowadzone analizy wyników i omawiający zaobserwowane związki o charakterze korelacyjnym pomiędzy parametrami czułymi na rozwój uszkodzenia pochodzącymi z różnych technik, na przykład niszczących i nieniszczących. Dzięki tym zabiegom rozprawa nabrała klasycznego wyglądu, pozwalającego jednoznacznie zidentyfikować wkład Doktoranta do współczesnej wiedzy.

Doktorant na moją prośbę zamieścił w swojej pracy jej streszczenie w języku polskim, ale niestety w dalszym ciągu brakuje streszczenia w języku angielskim. Jest to o tyle ważne, że nie da się współcześnie wypromować swoich wyników przed szerszym gremium odbiorców bez publikacji w języku angielskim, chociażby zawierającej właśnie streszczenie w tym języku.

Stwierdzam, że format spisu cytowanej literatury został nieco poprawiony, ale w dalszym ciągu odstaje w tym względzie od typowych książek lub monografii. Dobrym rozwiązaniem jest przyjęcie zasady kolejności cytowanych w spisie pozycji według alfabetycznego ustawienia od nazwisk pierwszych autorów. Dzięki temu unikamy, często pojawiających się przy innych zasadach numeracji, powtórzeń tych samych pozycji. Kilka takich powtórzeń wskazanych w poprzedniej wersji pracy zostało wyeliminowanych, ale niestety nie wszystkie. Pozycja 17 i 27 w aktualnej wersji rozprawy reprezentuje tę samą publikację.

Kolejna sygnalizowana już sprawa związana jest z tezą pracy. Doktorant nie postawił jej wyraźnie, co stanowi jednak odstępstwo od typowych rozpraw osób ubiegających się o stopnie naukowe doktora czy doktora habilitowanego. Na szczęście w recenzowanej pracy teza ta w pewien sposób wynika z opisów zawartych w kilku jej miejscach, ale co może najważniejsze, została moim zdaniem dostatecznie udowodniona. Podczas obrony prosiłbym jednak o wyraźne jej sformułowanie.

W poprzedniej recenzji postawiłem zarzut, że Doktorant problem aktualnego stanu wiedzy z zakresu swoich rozważań potraktował zbyt lakonicznie i z pominięciem wielu znaczących osiągnięć z przeszłości. Stwierdzam, że ta sprawa została wzięta pod uwagę przez

Doktoranta w zmodyfikowanej wersji rozprawy i chociaż w dalszym ciągu mam zastrzeżenia co do objętości tego opracowania, to jednak uważam, że w stopniu dostatecznym ujmuje pewien zakres najważniejszych osiągnięć uzyskanych w diagnostyce zarówno w kraju, jak i na arenie międzynarodowej.

W pierwszej recenzji wspomniałem, że strona edycyjna rozprawy była najsłabszym jej ogniwem do tego stopnia, że nie byłem w stanie wyszczególnić wszystkich usterek. Zdecydowana większość tych niedociągnięć została wyeliminowana z aktualnej wersji pracy, ale nie wszystkie. W formie ogólnej ważniejsze pozostawione uchybienia zostaną przedstawione w uwagach szczegółowych.

Rozprawa w dalszym ciągu zawiera błędy w terminologii fachowej, co więcej Doktorant nie poprawił ich mimo wskazówek, których udzieliłem. Sprawa dotyczy zastosowania liczby mnogiej do terminów „naprężenie”, „odkształcenie”, „przemieszczenie”, które wymagają z definicji użycia liczby pojedynczej. W mechanice nie ma miejsca na termin „odkształcenia” czy „naprężenia”, możemy jedynie mówić o składowych odkształcenia (naprężenia, przemieszczenia) lub wartościach odkształcenia (naprężenia, przemieszczenia). Przecież nie mamy definicji „tensora naprężeń”, „tensora odkształceń”, ale jest konkretna definicja „tensora naprężenia”, „tensora odkształcenia”, które mają swoje składowe.

Taka sama uwaga dotyczy terminów „temperatura”, „ciśnienie”. Nie mamy „ciśnień” ani „temperatur”, ale wartości ciśnienia i wartości temperatury.

W niektórych miejscach pracy Doktorant utożsamia termin „odkształcenie” z terminem „przemieszczenie”, a przecież są to zupełnie inne wielkości i mają inne jednostki.

W nowej wersji rozprawy Doktorant popełnił kilka poważnych błędów w zakresie definiowania parametrów pochodzących z próby ściskania, zwłaszcza chodzi tutaj o umowne granice sprężystości i plastyczności. Aby prawidłowo operować nazwami tych parametrów należy zdefiniować pojęcie uplastycznienia. W rozpatrywanym przez Doktoranta przypadku chodzi o tzw. „offset plastyczny” czyli wartość trwałego odkształcenia plastycznego, która dla granicy sprężystości wynosi 0.01%, a dla granicy plastyczności 0.2%. W obu przypadkach Doktorant błędnie operuje tutaj terminem „przesunięcia”. Muszę przyznać, że próby ściskania nie zostały przeprowadzone zgodnie z normą i stąd nic dziwnego, że wartości określonych parametrów mechanicznych są nieprawidłowe. Zgodnie z polską normą, aby wyznaczyć parametry mechaniczne (moduł Younga oraz granicę plastyczności) należy najpierw przeprowadzić ścisłą próbę ściskania na próbce 10-krotnej lub 3-krotnej (wielokrotność średnicy w części pomiarowej próbki), a pozostałe parametry wyznaczone są na próbkach krótszych, w tzw. zwykłej próbie ściskania. Doktorant stwierdza, że uzyskane wyniki są

nieprawidłowe, ale jednocześnie twierdzi, że granica plastyczności została określona prawidłowo. Niestety muszę zaprotestować. Jeżeli nie określono prawidłowo modułu Younga, to także umowna granica plastyczności z całą pewnością nie została poprawnie wyznaczona. Reasumując ten wątek, cały podpunkt 5.1.2 zawiera sporo błędów w terminologii, a tabela 5.1 przedstawia zafałszowane wyniki.

Podobnie jak w przypadku pierwszej mojej recenzji muszę przyznać, że od strony merytorycznej widać wiele interesujących aspektów pracy. Mimo istotnej poprawy w analizie prezentowanych wyników w dalszym ciągu jednak pojawia się uczucie zbyt płytkiej ich dyskusji. Niektóre wątki są jeszcze za słabo wyeksponowane i stąd pojawiają się pytania, na które trudno znaleźć odpowiedź. Wyniki otrzymane z badań techniką magneto-indukcyjną dają wprawdzie pewne wskazówki dotyczące rozwoju uszkodzenia, ale możemy tu mówić jedynie o zaobserwowanych tendencjach, natomiast skorelowanie czułych na rozwój uszkodzenia parametrów metod niszczących z parametrami metod nieniszczących byłoby zadaniem zbyt trudnym do przeprowadzenia dla jednak stosunkowo szczupłej bazy wyników, zaprezentowanej przez mgr inż. Tomasza Jasińskiego. Z tego powodu należy zgodzić się z Doktorantem, że konieczna jest kontynuacja tego typu prac i to na znacznie szerszą skalę.

Doktorant ulokował swoje osiągnięcia w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, ale wiele Jego wyników dotyczy również innych dyscyplin, jak na przykład inżynieria materiałowa, czy też automatyka, elektronika i elektrotechnika. Doktorant zajmuje się jednak głównie parametrami elektrycznymi lub magnetycznymi czułymi na rozwój degradacji materiału. Za moją namową przeprowadził próby powiązania parametrów technik magnetycznych z wybranymi parametrami mechanicznymi. Najlepiej powiodło się w tym aspekcie z wynikami mikrotwardości, które wykazują pewne tendencje odpowiadające zmianom parametrów z metody magneto-indukcyjnej. Moim zdaniem analiza taka wymaga dalszych intensywnych badań. Szkoda, że wyniki mikrotwardości nie zostały wyeksponowane w zależności od położenia na badanych łopatkach i nie podano, czy ułożenie punktów pomiarowych dla określenia twardości było jednakowe dla każdej łopatki.

W dalszym ciągu wyrażam swoje zdziwienie, że Doktorant nie zamieścił w swojej pracy żadnej charakterystyki rozciągania materiału łopatek turbin, a zamiast tego nieudanie przeprowadził cykl badań ściskania. Na podstawie prób rozciągania można by określić, jak zmieniają się podstawowe parametry mechaniczne wskutek eksploatacji w zależności od numeru wirników na turbinie. Jest to znacznie lepszy sposób określania stanu degradacji niż próby ściskania, które powodują zamykanie pojawiających się podczas eksploatacji pęknięć.

Za główny wkład Doktoranta do rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna uważam opracowanie bazy danych pozwalającej wskazać parametry czułe na rozwój degradacji materiałów, co ujęto w dwóch najważniejszych moim zdaniem rozdziałach pracy - piątym i szóstym.

W podsumowaniu, należy stwierdzić, że Doktorant realizując założone cele rozprawy wykazał się dość dobrą wiedzą ogólną z kilku dyscyplin, w tym „inżynierii materiałowej”, „inżynierii mechanicznej”, „automatyki, elektroniki i elektrotechniki”. Większość uchybień z pierwotnej wersji rozprawy zostało usunięte. Zrealizowany program bardzo trudnych badań o charakterze doświadczalnym pokazuje, że mgr inż. Tomasz Jasiński dobrze porusza się w obszarze technik diagnostycznych.

Ważniejsze uwagi merytoryczne wymieniono powyżej, a pozostałe, różnej natury, omówiono w następnym punkcie niniejszej recenzji.

3. Uwagi szczegółowe

Jak już zwracałem uwagę, pierwotna wersja rozprawy sprawiała uczucie dużego niedosytu pod względem wydawniczym. Poprawiona wersja jest pod tym względem istotnie lepsza, ale jeszcze dość daleka od doskonałości. Poniżej wymienię przykłady niezręczności językowych oraz potknięcia terminologiczne, które pozostały w nowej wersji rozprawy:

- (str. 9) Doktorant mówi o „złożonych procesach pełzania”, ale termin „proces pełzania” wymaga zastosowania liczby pojedynczej, być może chodziło o mechanizmy deformacyjne lub uszkodzenia towarzyszące pełzaniu;
- (str. 9) Doktorant nieszczęśliwie umieścił jednostki energii błędu ułożenia struktury za terminem odkształcenia materiału;
- (str. 9) Co to jest „parametr podobieństwa Poissona” ?;
- (str. 10) Jest: „związek ilości zliczeń refleksów”, powinno być: „związek liczby zliczeń refleksów”; ten sam błąd pojawia się jeszcze w kilku innych miejscach;
- (str. 13) Jest: „Para świeża jest o ciśnieniu 13 MPa”, powinno być: „Para świeża podawana jest pod ciśnieniem 13 MPa”;
- (str. 17) „Łopatki turbin są narażone na działanie silnych środowisk, takich jak wysokie temperatury, wysokie naprężenia i potencjalnie wysokie wibracje” – temperatura, naprężenie i wibracje nie są środowiskami;

- (str. 28) W takim przypadku [C] nie ma ograniczeń w dostępności do obiektu....” – co oznacza tajemnicze „[C]”?
- (str. 31) „Umożliwia ona diagnostykę nieciągłości strukturalnych spowodowanych procesami zmęczeniowymi, mechanicznymi, a także cieplnymi” – ale przecież obciążenia zmęczeniowe to też obciążenia mechaniczne.
- (str. 34) Rozdział pierwszy i drugi rozpoczyna się od niemal identycznego zdania, nie jest to dobra praktyka.
- (str. 43) We wzorze 34 występuje oznaczenie nigdzie nie objaśnione - „ R_c ”, natomiast identyfikuje się symbol „ R_F ” i chyba to on powinien figurować w tym wzorze.
- (str. 44) „W rzeczywistych układach magnetycznych oprócz czynników rezystancyjnych występują też inne, które są zależne od częstotliwości, np. zmiana parametrów magnetycznych rdzenia czy prądy wirowe w rdzeniu. Nie zawsze dopasowanie układu zastępczego jest w stanie uwzględnić wszystkie te czynniki”. Proszę o szerszy komentarz do cytowanego wyżej akapitu.
- (str. 69) „Przyjęte w energetyce metody NDT mimo ich wysokiej skuteczności, wykrywają jedyne defekty stanowiące nieciągłości materiału w skali nano.” - Chyba jednak chodzi o skale makro i mikro?
- (str. 71) Podpis rysunku 5.3 jest co najmniej zagadkowy, najpierw Autor napisał, że prezentuje twardości odpowiadające bliżej nieokreślonym zmianom, a dalej Autor napisał, że to mapy względnego stężenia pierwiastków.
- (str. 76) Przywołany w tekście rys. 5.6 nie odnosi się do tego, co na nim przedstawiono. Ponadto, na rysunku tym są dwa wykresy, na których brak jest opisu jednostek na osiach pionowych. Podobna uwaga dotyczy również rys. 5.12, 5.16, 5.20, 5.23.
- (str. 78) Rysunek 5.8 zawiera dwa schematy ilustrujące rozmiary wydzieleni węgla chromu, ale podpis rysunku tego nie uwzględnia.
- (str. 91) Rysunek 5.23 ilustruje dyfraktogram analizy rentgenowskiej osnowy i węglików dla materiału czterech łopatek. Doktorant ograniczył się tylko do lakonicznych informacji na temat, gdzie prowadzono testy i kto je nadzorował, natomiast brak jest szerszej dyskusji tego, jakie efekty można na rysunku zaobserwować.
- (str. 91 i 92) Pomiędzy tekstami na stronach 91 i 92 brak jest związku przyczynowo skutkowego. Czytelnik może odnieść wrażenie, że zabrakło jakiegoś łącznika myślowego.
- (str. 93) Opis osi oraz legenda rysunku 5.26 nie korespondują ze sobą; w legendzie jest CrC, a na prawej osi pionowej jest Cr₂₃C₆.

(str. 113) Rysunek 6.10 zawiera cztery różne schematy dotyczące faz degradacji materiału, ale Doktorant nie umieścił żadnego ich opisu w podpisie.

(str. 115) Na stronie 115 Doktorant opisuje, jak przelicza wartości twardości wyrażone w skali Brinella na wartości odpowiadające skali Vickersa stosując bardzo zabawny, ale niestety świadczący o niezbyt dobrej kompetencji, żargon, cytuję „norma PN-75/H-84024 podaje wartości w Brinellach (HB), dlatego w celu właściwego porównania z wartościami zmierzonymi przeliczono wartości z normy na Vickersy (HV) za pomocą tabeli”

(str. 119) Doktorant formułuje następujące zdanie: „Wyniki badań [105] dowodzą liniowej zależności pomiędzy mikrotwardością a granicą plastyczności.” Niestety, nie ma w tym miejscu żadnej wzmianki, czy taka zależność występowała w wynikach badań Doktoranta. Proszę zatem o przedstawienie jednoznacznej odpowiedzi, czy taka liniowa zależność uzyskana została także w przeprowadzonych badaniach?

(str. 123) Doktorant posługuje się nazwą „elektrownie zawodowe”. Proszę wyjaśnić, jak należy to rozumieć?

Ponadto,

(a) W wielu miejscach pracy wymieniane są badania łopatek, które nie były eksploatowane i nazywa się je wymiennie jako „nowe”, „współczesne”, „nieeksploatowane”, „materiał odniesienia”, „nowy materiał”. Proponowałbym w przyszłości ujednoczyć nazewnictwo, ponieważ język nauki powinien być jednoznaczny i ścisły.

(b) Przy jednoczesnym cytowaniu kilku pozycji ze spisu literatury w wielu miejscach rozprawy nie zachowany jest numeryczny porządek, np. str. 111, 114, 115.

Na zakończenie niniejszego podpunktu recenzji przedstawiam przykłady żargonowych lub niegramatycznych zdań, których Doktorant powinien w przyszłości unikać, podaję je bez komentarza:

(str. 27)

„Jaskółcze ogony” są szczególnie podatne na pękanie zmęczeniowe i korozyjne naprężeniowe, a interesujące pęknięcia są zazwyczaj małe.”

(str. 40)

„(zależy ona także bowiem od rezystancji strat)”

(str. 71)

„Łopatki stopnia 6. charakteryzują się znacznym zrównaniem twardości po powierzchni przekroju przy zbliżeniu twardości do materiału wejściowego, co przedstawia rysunek 5.3”

(str. 89)

„W przypadku łopatek z wirnika turbiny ma się do czynienia ze złożonym stanem naprężenia o różnej intensywności pomiędzy łopatkami, ze względu na ich długość i siły odśrodkowe, a co za tym idzie – ze zmiennymi i złożonymi procesami pełzania.”

(str. 108)

„Pomimo tego samego czasu eksploatacji stan złożonego naprężenia i pełzanie wywiera wpływ na powyższe parametry, jak obserwuje się to na rysunku 6.5.”

I dalej:

„W wysokich przedziałach częstotliwości pomiarowych nie zarejestrowano zmian o podobnym charakterze.”

4. Wniosek końcowy

Mgr inż. Tomasz Jasiński jest autorem rozprawy doktorskiej wnoszącej wystarczający wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, głównie w zakresie diagnostyki materiałów stosowanych w konstrukcjach energetycznych. Zamieszczone w niniejszej recenzji uwagi krytyczne mają charakter zarówno merytoryczny, jak i dotyczący strony edycyjnej. W pewnej mierze zmniejszają one jednak wartość całej rozprawy. W porównaniu do pierwotnej wersji pracy należy zauważyć duży postęp, zwłaszcza od strony wydawniczej. Praca napisana jest teraz istotnie lepszym językiem, który potencjalnemu czytelnikowi nie powinien stwarzać problemów w zrozumieniu jej treści. Również strona merytoryczna rozprawy nabrała pozytywnego charakteru, chociaż można by jeszcze tutaj wiele jej elementów poprawić, względnie rozwinąć.

Mając na uwadze wszystkie wymienione powyżej aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca w aktualnej postaci spełnia w stopniu dostatecznym wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym, zgodnie z art.179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. (przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna”.

Zawadzki