

Kielce 25.06.2015

Prof. dr hab. inż. Bogdan Antoszewski
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Centrum Laserowych Technologii Metali
Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Stanclika

„Sposoby ograniczania wpływu ciepła tarcia na pracę uszczelnienia o styku rozproszonym”
wykonana na zlecenie Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki
Wrocławskiej w oparciu o pismo Dziekana w/w Wydziału Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniewa
Gnutka nr W9/PW/585/2015 z dnia 13.05.2015, na podstawie otrzymanego egzemplarza
rozprawy doktorskiej

1. Wstęp

Przedłożona do recenzji rozprawa jest pracą o charakterze teoretyczno-eksperymentalnym i mieści się w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Zawiera łącznie z załącznikiem, wykazem literatury, spisem tabel i rysunków oraz wykazem ważniejszych oznaczeń 96 stron. Wykaz cytowanej literatury obejmuje 70 pozycji. Nazwisko Doktoranta rozprawy w wykazie literatury jest przywołane czterokrotnie w tym raz jako współautora zgłoszenia patentowego. Treść rozprawy podzielona jest na dziewięć rozdziałów. Tytuł rozprawy *Sposoby ograniczania wpływu ciepła tarcia na pracę uszczelnienia o styku rozproszonym* w zasadzie odpowiada zawartości pracy tym niemniej mógłby być sformułowany nieco inaczej. Po pierwsze użyte słowo *Sposoby...* w liczbie mnogiej sugeruje, że w pracy będzie rozpatrywanych co najmniej dwa sposoby a faktycznie jest jeden. Sposób obudowany uzasadnieniem naukowym staje się metodą więc może lepiej by brzmiało *Metoda....* Po drugie słowo *styk* jest tu użyte jako pojęcie tribologiczne a więc powinno być *styk rozłożony* (może dyskretnie ale jednak) a nie rozproszony. Ostateczny tytuł pracy mógłby być taki *Metoda ograniczenia wpływu ciepła tarcia na pracę uszczelnienia o styku rozłożonym*.

2. Uwagi dotyczące tematyki rozprawy, sformułowanego celu i tezy oraz zakresu pracy

Przedmiotem pracy są zagadnienia dotyczące ogólnie techniki uszczelniania i już z tego powodu praca ta zasługuje na uwagę, gdyż w kraju tą bardzo ważną dziedziną zajmuje się zdecydowanie zbyt wąska grupa osób. Same uszczelnienia szczotkowe są mało rozpowszechnione i rozpoznane zwłaszcza w obszarze zastosowań jako uszczelnienie stykowe przy ruchu obrotowym. Tym samym podjęcie tematyki badawczej dotyczącej ruchowych uszczelnień szczotkowych uważam za przedsięwzięcie trafione i potrzebne. Zakres pracy został ograniczony do rozpoznania zagadnień cieplnych i mechanicznych będących skutkiem tarcia w samoregulującym się styku uszczelnienia z wałem. Oczywiście taki zakres nie zaspakaja w pełni ciekawości badacza nie mniej jednak jest wystarczająco obfity w problemy naukowe aby mógł stanowić tematykę rozprawy doktorskiej. W recenzowanej pracy Doktorant stawia tezę że *...możliwe jest wykorzystanie do budowy uszczelnienia szczotkowego elementów bimetalowych, które pełnią funkcję termoregulacyjną poprzez odciążanie obszaru styku drucików z powierzchnią wału*. Oryginalność tak przedstawionej tezy zasadza się w wykorzystaniu znanego rozwiązania (bimetal) do nowego zastosowania. Cel pracy nie jest wprost wyartykułowany ale można się domyślać, że Doktorantowi głównie chodzi o wykazanie przydatności i skuteczności zaproponowanego rozwiązania z elementami bimetalowymi. Jest to cel zdecydowanie aplikacyjny. Celu naukowego autor nie przedstawia. Przydatność zaproponowanego rozwiązania Doktorant widzi głównie w fazie rozruchu i wybiegu gdzie występują największe obciążenia cieplne a tym samym regulacja jest jak najbardziej wskazana.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy i uwagi merytoryczne

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawia przegląd literatury na temat uszczelnień szczotkowych. Z przeglądu tego wynika że największa uwaga badaczy skupiona jest na ocenie wycieku z uszczelnienia. Prace w tym zakresie mają charakter eksperymentalny oraz przedstawiane są jako zagadnienia do obliczeń z wykorzystaniem numerycznej mechaniki płynów (CFD). Atrakcyjność tych badań polega na tym, że przy zastosowaniu uszczelnień szczotkowych następuje wielokrotne zmniejszenie wycieku w porównaniu do uszczelnień labiryntowych, co bezpośrednio przekłada się na wzrost sprawności analizowanej maszyny przepływowej. Ponadto mgr inż. Michał Stanlik w dokonany przeglądzie dostrzega zainteresowanie badaczy problemami takimi jak;

- powstawanie siły nośnej skutkującej radykalnym zmniejszeniem wartości momentu tarcia,
- specyficzny rozkład ciśnienia w palisadzie prętów zwłaszcza w kierunku radialnym,
- analiza wpływu wcisku na prace uszczelnienia,
- odkształcenia elementów uszczelnienia pod wpływem obciążeń od gradientu ciśnienia i przepływu płynu przez palisadę uszczelnienia, oraz tarcie uszczelnienia o wał.

Oddzielną uwagę Doktorant poświęca zagadnieniom cieplnym poruszonym w dostępnej literaturze. Wynika z tego że zagadnienia cieplne w uszczelnieniu szczotkowym nie należą do tematów dużej liczby publikacji. Zagadnienia te badane są zarówno metodami empirycznymi i tu ograniczają się do pomiarów temperatury w różnych strefach uszczelnienia oraz metodami numerycznymi gdzie wyznaczane są strumienie ciepła oraz pola temperatury.

W podsumowaniu przeglądu literatury Doktorant rozprawy stwierdza, że jednym z istotnych problemów związanych z eksploatacją uszczelnień szczotkowych jest nadmierne obciążenie cieplne końcówek szczotki wynikające z tarcia o powierzchnię wału. Zjawisko to jest niekorzystne z kilku powodów, prowadzi do szybkiego zużywania się elementów szczotki co powoduje zwiększenie szczeliny a tym samym wzrost wycieku. Konsekwencja tego przeglądu literatury jest określenie celu i zakresu pracy. Cel pracy Doktorant określił jako weryfikację skuteczności działania zaproponowanego rozwiązania polegającego na wykorzystaniu elementów bimetalowych do termicznego zabezpieczenia uszczelnienia. Teza przytoczona w tym rozdziale jest spójna z celem pracy i w zasadzie nie wnosi nic nowego po za tym, że sprowadza się do dowodu na spadek temperatury w fazie rozruchu i wybiegu przy zastosowaniu uszczelnienia z prętami bimetalowymi. Rozdział pierwszy kończy się podrozdziałami zatytułowanymi *Budowa uszczelnienia szczotkowego* i *Zjawiska towarzyszące pracy uszczelnienia szczotkowego*. Te dwa podrozdziały powinny znaleźć miejsce w rozdziale drugim.

Rozdział drugi zawiera przegląd rozwiązań konstrukcyjnych uszczelnień szczotkowych. Uwzględniono cztery odmiany uszczelnień szczotkowych plus odmiany różniące się rozwiązaniami konstrukcyjnymi obudowy. Opisy niektórych konstrukcji są przedstawione bardzo skrótowo a w przypadku segmentowego uszczelnienia szczotkowego Doktorant opis opiera na fotografii fragmentu uszczelnienia.

W rozdziale trzecim zatytułowanym *Stanowisko badawcze* opisane jest stanowisko badawcze a także obiekt oraz przebieg badań. Przedstawiony jest widok stanowiska oraz przekrój komory stanowiska. Na uwagę zasługuje zastosowanie nowoczesnych metod pomiarowych takich jak; kamera termowizyjna oraz pomiar temperatury z zastosowaniem

czujnika o średnicy $0,075\text{ mm}$. Oprócz badań właściwości cieplnych prowadzonych według ustalonej procedury (prowadzenie pomiarów do czasu ustabilizowania się temperatury) Doktorant dodatkowo wyznacza współczynniki emisyjności materiału uszczelnienia oraz pozostałych elementów stanowiska. Cykl badawczy obejmuje biegi badawcze w zakresie prędkości od $500\text{ do }4000\text{ obr/min}$ i wcisków od $0,05\text{ do }0,5\text{ mm}$. Wynikiem pomiarów jest wartość ustabilizowanej temperatury uszczelnienia, jej rozkład oraz moment tarcia. Doktorant nie podaje kryterium stabilizacji ani nie precyzuje dokładnie umiejscowienia czujnika temperatury (wskazuje to tylko strzałka na fotografii - to zbyt mało jeśli zachodziła by potrzeba np. wymiany czujnika). Nie wiadomo nic na temat czasu trwania stabilizacji. Doktorant pisze o szybkim wzroście temperatury elementów uszczelnienia. Zachodzi pytanie jak szybki to przyrost? Czy nie można było przedstawić wykresu zmian temperatury w funkcji czasu?

Rozdział czwarty dotyczy strumienia ciepła tarcia w uszczelnieniu który oceniany jest na podstawie pomiarów momentu tarcia a także obliczeń metodami analityczną i numeryczną. Aby dokonać obliczeń Doktorant przyjmuje za producentem uszczelnienia wartość współczynnika tarcia oraz wylicza siłę nacisku elementów uszczelnienia na wał. W rozdziale tym wyznaczona zostaje również niepewność pomiaru wartości strumienia ciepła. W obliczeniach analitycznych wyjaśnienia wymaga sposób przejścia od nacisku pojedynczego elementu szczotki uszczelnienia do całej szczotki której elementy są przecież w kontakcie. Na jakiej podstawie w analizie numerycznej ustalono odległość pomiędzy elementami palisady na wartość $0,1d$ gdzie d jest średnicą elementu palisady.

Wytworzony na skutek tarcia strumień ciepła podlega rozdziałowi i to zagadnienie jest przedmiotem rozważań w rozdziale piątym. Doktorant rozpatruje tu problem szczególnie (zbieżny z przeprowadzonym eksperymentem) polegający na tym, że w rozdziale strumienia ciepła nie bierze udziału czynnik przepływający przez uszczelnienie. Wobec powyższego ciepło rozdziela się pomiędzy wał a uszczelnienie. Określenie proporcji rozdziału strumienia ciepła dokonano poprzez obliczenia numeryczne z wykorzystaniem wyników pomiarów oraz programu ANSYS. Budowa modelu, przyjęte założenia oraz procedura obliczeń nie budzą zastrzeżeń. Na podkreślenie zasługuje staranność obliczeń właściwości cieplnych uszczelnienia oraz współczynnika wnikania ciepła. Ostatecznie wyznaczony współczynnik rozdziału ciepła ma wartość $0,45\div 0,51$ co oznacza, że ciepło tarcia jest odbierane w podobnym stopniu przez wał jak i uszczelnienie. Można tu mieć zastrzeżenia co do trafności wyboru koncepcji badań i rezygnacji z pomiarów z udziałem przepływu czynnika. Moim

zdaniem to uproszczenie zmienia warunki pracy uszczelnienia i zdecydowanie osłabia możliwość samoregulacji uszczelnienia.

Zagadnieniom uszczelnienia z wbudowanymi elementami bimetalowymi poświęcone są kolejne trzy rozdziały pracy. W rozdziale szóstym przedstawiona jest ogólna koncepcja zastosowania bimetalowych elementów termoregulacyjnych w uszczelnieniu. Opis jest bardzo ogólny jak domyślam się z powodu prowadzenia postępowania patentowego.

Istotnym elementem pracy z punktu widzenia udowodnienia wyższości uszczelnienia z elementami termo-regulacyjnymi jest wykazanie, że temperatura równowagi w przypadku zastosowania tych elementów będzie niższa niż w uszczelnieniu bez nich. Doktorant dowód ten przeprowadza na drodze obliczeń analitycznych, numerycznych a także badań eksperymentalnych. Posługuje się przy tym uproszczeniem polegającym na analizie nie całego uszczelnienia tylko jednego segmentu zawierającego element bimetalowy. Podejście takie jest uzasadnione bo wykonanie całego uszczelnienia wymaga specjalistycznego oprzyrządowania i odpowiedniej niedostępnej w warunkach uczelni technologii. Rozpatrywane są trzy konfiguracje segmentu z pięcioma, siedmioma i dziewięcioma zwykłymi elementami na jeden element bimetalowy. Kluczowe znaczenie w tych badaniach miało określenie siły nacisku segmentu uszczelnienia na współpracującą powierzchnię. Do numerycznego wyznaczenia sił nacisku segmentu uszczelnienia Doktorant wykorzystuje oprogramowanie ABAQUS a w podejściu analitycznym elementy segmentu traktowano jako zginaną belkę. Do osiągnięcia końcowego efektu konieczne było przyjęcie modelu matematycznego elementu bimetalowego. W dalszej części wywodu Doktorant z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Mechanical przeprowadza sprzężoną analizę cieplno mechaniczną umożliwiającą wyznaczenie temperatury równowagi uszczelnienia. W zależności od konfiguracji segmentu wyliczona temperatura równowagi kształtuje się w granicach od 82 do 100 °C co jest temperaturą wyraźnie niższą od tej którą zaobserwowano w doświadczeniu z uszczelnieniem bez elementów bimetalowych. Nawiązując do eksperymentu opisanego w tym rozdziale zachodzi pytanie. Dlaczego Doktorant podaje na str. 67, że prowadził badania w zakresie temperatur od 20 do 400 °C a podaje wyniki jedynie w zakresie od 20 do 80 °C w żaden sposób tego nie komentując? Czy zatem dobrze dobrany został materiał bimetalowy? Jak rozumieć wynik przedstawiony na rys.7.12 b zatytułowanym *Spadek nacisku segmentu w zależności od temperatury* gdzie ten spadek jest największy przy temperaturze 20 °C.

W rozdziale ósmym rozpatrywana jest szczelność uszczelnienia. Doktorant porównuje wyniki własnych obliczeń numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych dostępnych w literaturze. W obliczeniach analizowany jest przepływ płynu ściśliwego przez palisadę uszczelnienia zawierającą element bimetalowy. Do obliczeń wykorzystano program ANSYS FLUENT. Analizowano przepływ płynu przez palisadę elementów odkształconych przez wcisk oraz bimetal w zakresie różnic ciśnień od 0 do 4 bar przy temperaturze równowagi. Uzyskane wyniki przedstawione jako wartość wycieku na 1mm obwodu uszczelnienia jakościowo są zgodne z wynikami podanymi przez firmę Cross Manufacturing.

Oprócz opisanych wcześniej rozdziałów praca zawiera podsumowanie oraz załącznik z wybranymi wynikami badań oraz danymi materiałowymi.

4. Uwagi szczegółowe

W pracy zauważono usterki natury gramatycznej, redakcyjnej, językowej i inne ale nie miały one wpływu na właściwe zrozumienie tekstu. Niżej przedstawiono niektóre z nich;
str.28 Rys 3.1 podpis jest *Elementy składowe stanowiska* powinno być *Widok stanowiska badawczego*,

str.29 wiersz 6 od góry jest *...widać także kierunek pomiaru kamerą termowizyjną ...* powinno być *... widać umiejscowienie kamery termowizyjnej ...*,

str.31 Rys. 3.4 brak skali temperatury, podpis jest *Wzrost temperatury* powinno być *Mapa rozkładu temperatury...*,

str.38 rys 4.7 i wielokrotnie *wyniki numeryczne , wyniki analityczne* powinno być *wyniki obliczeń numerycznych, wyniki obliczeń analitycznych*,

str. 32 wzór 4.1 dwukrotnie użyto symbol n ,

str.94 pomyłono oznaczenie kolumn tabeli

5. Ogólna ocena pracy

Doktorant wykazał umiejętność prowadzenia badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych i analitycznych. Potrafi analizować wyniki badań i formułować wnioski. Za oryginalne osiągnięcie Doktoranta uznaję zaprezentowaną metodę badania zmian cieplno mechanicznych w uszczelnieniu z elementami bimetalowymi co można uznać jako osiągnięcie naukowe. Wykazane potwierdzenie skuteczności działania uszczelnienia z elementami bimetalowymi mam nadzieję, że zachęci producentów uszczelnień szczotkowych do wytworzenia prototypu takiego uszczelnienia co pozwoli przeprowadzić bardziej

szczegółowe badania. Na podkreślenie zasługuje biegłość Doktoranta rozprawy w posługiwaniu się wieloma skomplikowanymi programami wspomagającymi obliczenia numeryczne.

6. Podsumowanie

Podsumowując przeprowadzoną opinię o rozprawie Pana mgr inż. Michała Stanclika stwierdzam że:

- zagadnienie naukowe podjęte przez Doktoranta zostało wybrane i sformułowane prawidłowo,
- cele pracy zostały osiągnięty przy czym sposób realizacji założonych celów stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- realizując pracę Doktorant wykazał się samodzielnością, umiejętnością organizowania badań doświadczalnych a także szeroką wiedzą zwłaszcza w zakresie obliczeń z wykorzystaniem metod numerycznych,
- wyniki przedstawionych w pracy badań poszerzają wiedzę o uszczelnieniach szczotkowych oraz mają duże znaczenie praktyczne zwłaszcza w aspekcie zastosowania segmentów uszczelnień z elementami bimetalowymi.

Stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Michała Stanclika spełnia warunki Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i tym samym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

