

Prof. dr hab. inż. Wojciech WIELEBA  
Politechnika Wroclawska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii  
50-370 Wrocław, ul. Łukasiewicza 5,  
tel. (071) 3202774,  
E-mail: wojciech.wieleba@pwr.edu.pl

Wrocław, 16 czerwca 2015

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Stanclika  
p.t.

„Sposoby ograniczania wpływu ciepła tarcia na pracę uszczelnienia o styku rozproszonym”

(Podstawa formalna recenzji: pismo Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 13.05.2015 r.)

### 1. Geneza problematyki rozprawy i ocena podjętego tematu

Uszczelnienia techniczne stanowią jedną z ważniejszych grup elementów maszynowych decydujących o trwałości i niezawodności całego urządzenia. Ich zadaniem jest przede wszystkim zapobieganie przeciekom oraz zapewnienie jak najlepszych warunków pracy dla innych elementów maszyn tj. odpowiednie warunki smarowania a także ochrona przed warunkami otoczenia (np. zapyleniem, agresywnym chemicznie środowiskiem itp.). Powstałe wycieki mogą powodować skażenie środowiska, stąd również względy ekologiczne mają wpływ na poszukiwanie rozwiązań, zarówno w dziedzinie konstrukcji uszczelnień jak i doborze materiałów, które zapewnią większą trwałość uszczelnienia. Postęp techniczny wymaga wprowadzania nowych bądź ulepszania istniejących rozwiązań konstrukcyjnych w obszarze budowy maszyn. Najczęściej stosowanymi uszczelnieniami w turbinach gazowych oraz parowych są bezstykowe uszczelnienia labiryntowe. Wynika to przede wszystkim z ich zdolności do pracy przy bardzo dużych prędkościach obrotowych oraz w wysokiej temperaturze. Niestety w tego typu uszczelnieniach zawsze występują wycieki gdyż ze względów technicznych pracy takiego uszczelnienia (rozszerzalność cieplna materiałów uszczelnienia, drgania, odkształcenia elementów uszczelnienia itp.) nie jest możliwe zmniejszanie wielkości szczeliny labiryntu poniżej pewnych granicznych wartości. Wymaganiom dotyczącym minimalizacji wycieków są w stanie sprostać uszczelnienia o styku rozproszonym, tzw. „uszczelnienia szczotkowe”, będące przedmiotem analiz prowadzonych przez Doktoranta. Jednak w takich uszczelnieniach problemem jest tarcie występujące pomiędzy wałem a elementami uszczelnienia. Rozpraszanie energii w wyniku tarcia powoduje zmniejszenie sprawności urządzenia oraz, przede wszystkim, generowanie ciepła. Skutkiem tego jest między innymi

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia 19-06-2015

29/729

wzrost temperatury elementów wężła uszczelniającego. Zwiększenie temperatury materiału uszczelnienia może w skrajnym przypadku prowadzić do jego uszkodzenia a w konsekwencji awarii całego urządzenia. Dlatego obecnie w uszczelnieniach stykowych dąży się do minimalizacji ciepła generowanego wskutek tarcia a także do jak najskuteczniejszego jego odprowadzania z uszczelnienia. Wydaje się więc zasadnym podjęcie tej problematyki przez Doktoranta. Tematyka oraz zakres pracy obejmują zagadnienia związane z techniką uszczelniania ruchomych wężłów maszyn a zatem jest ściśle związana z **budową i eksploatacją maszyn**.

## 2. Charakterystyka ogólna – układ pracy, treść, literatura, redakcja

Praca jest podzielona na dziewięć rozdziałów prezentujących zarówno studia literaturowe Doktoranta nad zagadnieniami związanymi ze zjawiskami i procesami towarzyszącymi pracy uszczelnień szczotkowych jak również, przede wszystkim, Jego badania i analizy dotyczące ciepła tarcia w uszczelnieniu o styku rozproszonym oraz przepływu przez nie płynów. Doktorant zaproponował nowe, innowacyjne rozwiązanie takiego uszczelnienia z wbudowanymi elementami bimetalowymi. Przedstawił jego model oraz przeprowadził analizę jego pracy.

Rozprawa jest edytowana na 96 stronach. Wykaz literatury zawiera 70 pozycji aktualnej, głównie zagranicznej literatury. Praca jest właściwie zilustrowana graficznie a dane uporządkowane są tabelarycznie. Część z nich znajduje się w załącznikach zamieszczonych na końcu dysertacji. Edycja całości jest poprawna, choć nie do końca przejrzysta, drobne uwagi jej dotyczące zamieszczam w załączniku.

### *Zawartość poszczególnych rozdziałów pracy:*

Pracę tworzy dziewięć rozdziałów. Na początku przedstawiono spis tabel i rysunków oraz wykaz oznaczeń stosowanych w dysertacji. Pierwszy rozdział to wprowadzenie do podjętej problematyki. Zawiera on m.in. przegląd literatury a także cel i tezę pracy. Omówiona została również budowa uszczelnienia szczotkowego oraz zjawiska występujące podczas jego pracy. Rozdział drugi stanowi przegląd rozwiązań konstrukcyjnych uszczelnień szczotkowych. Kolejny rozdział przedstawia stanowisko badawcze oraz przyjętą metodę badania temperatury uszczelnienia. W rozdziale czwartym omówiono ciepło tarcia generowane podczas pracy uszczelnienia. Określono siłę nacisku uszczelnienia na wał metodą analityczną i numeryczną. Wykorzystując obie metody Doktorant przeprowadził obliczenia ciepła tarcia dla różnych warunków pracy wybranego uszczelnienia i porównał otrzymane wyniki z rezultatami badań eksperymentalnych. Ponadto część rozdziału dotyczy analizy niepewności pomiarów. Rozdział piąty poświęcony został podziałowi strumienia ciepła tarcia. Przedstawiono w nim założenia oraz wyniki analiz numerycznych umożliwiające wyznaczenie temperatury elementów uszczelnienia. W kolejnym rozdziale zaprezentowano

budowę uszczelnienia szczotkowego z termoregulacyjnymi elementami bimetalowymi oraz omówiono sposób jego działania. Rozdział siódmy dotyczy sposobów określania temperatury analizowanego uszczelnienia podczas jego pracy w warunkach równowagi cieplnej. Podczas obliczeń siły nacisku segmentu uszczelnienia na wał wykorzystano, w celach porównawczych, zarówno metodę analityczną jak i numeryczną. Otrzymane wyniki porównano z wartościami uzyskanymi eksperymentalnie. Następnie wykorzystując model numeryczny wyznaczono temperaturę uszczelnienia w miejscu styku z wałem w warunkach równowagi wymiany ciepła. Obliczenia zostały przeprowadzone dla modelu uszczelnienia zawierającego elementy bimetalowe. W rozdziale ósmym rozpatrywano szczelność analizowanego uszczelnienia. Wyniki modelowania z wykorzystaniem metod numerycznych porównano z wynikami badań eksperymentalnych prezentowanych w literaturze. Potwierdzono dużą zgodność opracowanego modelu z wynikami eksperymentalnymi. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Na końcu pracy zamieszczono bibliografię a także załączniki zawierające właściwości materiałów wykorzystywanych w analizowanym uszczelnieniu szczotkowym, rysunek uszczelnienia zawierający jego wymiary a także zestawienia wyników badań eksperymentalnych oraz obliczeń metodami analitycznymi i numerycznymi.

### 3. Uwagi ogólne

Przedmiotem opiniowanej rozprawy jest próba analizy pracy nowego rozwiązania uszczelnienia o styku rozproszonym z zabezpieczeniem termicznym, którego autorem jest Doktorant. Doktorant postawił sobie za cel zweryfikowanie skuteczności działania takiego rozwiązania. **Niewątpliwym walorem pracy jest tematyka związana z nowoczesnymi technologiami uszczelnień pracujących w trudnych warunkach tj. przy dużej prędkości obwodowej i podwyższonej temperaturze.** Zagadnienie podjęte w rozprawie jest ważne i aktualne ze względu na obszar stosowania rozpatrywanych uszczelnień (np. w maszynach przepływowych) oraz problematykę ochrony środowiska.

Po przeprowadzeniu analizy obecnego stanu wiedzy Doktorant sformułował tezę, że możliwe jest wykorzystanie elementów bimetalowych w uszczelnieniach szczotkowych, które pełniłyby funkcję termoregulacyjną. **Przedstawione rezultaty badań i analiz potwierdziły postawioną tezę a przeprowadzenie przez Doktoranta analizy różnorodnych procesów i zjawisk występujących w uszczelnieniu będącym tematem rozprawy jest dodatkowym walorem pracy.** Świadczy to o umiejętnościach prowadzenia przez Doktoranta badań oraz analizy uzyskanych wyników i stanowi wartość jego pracy oraz dorobek.

Doktorant zaproponował autorskie rozwiązanie konstrukcyjne uszczelnienia, które minimalizuje wpływ ciepła tarcia na pracę uszczelnienia i ogranicza

**do minimum możliwość jego uszkodzenia w wyniku nadmiernego wzrostu temperatury. Stanowi to dodatkowy atut rozprawy.** Wykorzystanie elementów bimetalowych stanowi innowacyjny sposób zabezpieczenia uszczelnienia przed przegrzaniem i umożliwia obniżenie temperatury pracy uszczelnienia.

Opracowany przez Doktoranta model analityczny uszczelnienia z elementami bimetalowymi umożliwia w szybki sposób wytypować odpowiednie materiały a także liczbę elementów bimetalowych a następnie wykorzystując opracowany model numeryczny wyznaczyć temperaturę uszczelnienia. Dzięki temu możliwy jest na etapie konstruowania taki dobór materiałów i elementów bimetalowych, aby temperatura uszczelnienia w miejscu jego styku z wałem przy zadanych parametrach pracy nie przekroczyła określonej wartości dopuszczalnej.

Oprócz niewątpliwych zalet pracy muszę – z przykrością – wskazać na pewne mankamenty.

1. Kompozycja pracy jest moim zdaniem nieco chaotyczna. Na przykład w rozdziale 1, stanowiącym wstęp, przedstawiono w postaci podrozdziałów, przegląd literatury, budowę analizowanego uszczelnienia a także zjawiska towarzyszące pracy uszczelnienia. Równocześnie w rozdziale drugim przedstawiono również rozwiązania konstrukcyjne uszczelnień szczotkowych. Z kolei zjawiska towarzyszące pracy uszczelnienia mogłyby być przedstawione w rozdziale 4 dotyczącym ciepła tarcia. Również rozdziały 4 i 5 można było połączyć w jeden, ponieważ oba rozdziały dotyczą zagadnienia ciepła tarcia.
2. Analiza literatury jest mało urozmaicona. Obszernie zostały przedstawione przede wszystkim wyniki badań i analiza pracy uszczelnień szczotkowych prowadzone przez różnych badaczy. Zabrakło szerszego omówienia literatury dotyczącej problematyki tribologicznej, dyssypacji energii tarcia w postaci ciepła a także przepływu ciepła. Zabrakło również moim zdaniem przykładowych rysunków, schematów, zdjęć bądź wykresów prezentowanych w źródłach literaturowych, które dodatkowo ilustrowałyby opisywaną w tej części rozprawy problematykę badawczą. Ponadto przegląd literatury powinien moim zdaniem stanowić odrębny rozdział. Należało również wyraźnie pogrupować literaturę wokół określonej problematyki.
3. W rozdziale 3 „Stanowisko badawcze” przedstawiono budowę stanowiska, metodę prowadzenia pomiarów oraz wyniki badania jednego z uszczelnień. Mając na uwadze tytuł rozdziału nie jest to do końca zrozumiałe, chyba, że celem było zaprezentowanie metody badawczej oraz zilustrowanie jej przykładem. Wówczas proponowałbym zatytułować rozdział „Metoda badawcza”
4. Podczas analizowania ciepła generowanego w uszczelnieniu w wyniku tarcia Doktorant przyjął na podstawie danych literaturowych stałą wartość współczynnika tarcia. Nie jest to do końca prawdziwe założenie, gdyż wiele publikacji dotyczących zagadnień tribologicznych przedstawia zależność współczynnika tarcia od warunków ruchowych tarcia, takich jak: prędkość względna

poślizgu, nacisk jednostkowy czy temperatura materiałów pary trącej. Różnice mogą być duże, co oczywiście wpływa znacząco na ilość ciepła tarcia. Brakuje moim zdaniem w pracy charakterystyk tarciovych analizowanych w rozprawie materiałów uszczelnienia i wału.

5. W rozdziale 4.3 (objętościowo jedna strona) przedstawiono zestawienie, które wręcz ascetycznie prezentuje wyniki obliczeń analitycznych, obliczeń z wykorzystaniem metod numerycznych oraz doświadczalne wyznaczone ilości ciepła generowanego podczas współpracy uszczelnienia szczotkowego z wałem. Nie do końca wyjaśniono, jakie przyjęto założenia przy wyznaczaniu ilości ciepła metodami teoretycznymi a także, w jaki sposób określono ilość ciepła eksperymentalnie.
6. W rozprawie omówiono niepewność pomiaru (rozdz. 4.4) natomiast zabrakło analizy statystycznej przeprowadzonych badań. Nie ma informacji o liczbie powtórzeń pomiarów, odchyłkach czy też przedziałach ufności w tabelach prezentujących wyniki badań doświadczalnych.

Mimo powyższych uwag rozprawę oceniam wysoko, zarówno w aspekcie poznawczym jak i metodologicznym. Doktorant wykazał się umiejętnością analizy aktualnego stanu wiedzy dotyczącego uszczelnień szczotkowych, opracowania programu badań a także wykorzystania szerokiego wachlarza metod analitycznych i numerycznych. Umożliwiło mu to zaproponowanie innowacyjnego rozwiązania konstrukcyjnego uszczelnienia szczotkowego z elementami bimetalowymi zapewniającymi jego termoregulację.

Podsumowując należy stwierdzić, że Doktorant zrealizował w pełni postawione w rozprawie cele a także potwierdził postawioną tezę. Uważam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska stanowi istotny wkład Autora w dziedzinę **Budowa i Eksploatacja Maszyn**.

#### 4. Uwagi szczegółowe

Szczegółowa analiza pracy zmusza do wskazania pewnych usterek, niejasności formalno-merytorycznych oraz drugorzędnych błędów typu językowego. Wymieniam je w załączniku, który jest integralną częścią niniejszej opinii.

#### 5. Ocena i wniosek końcowy

- *Zagadnienie naukowe i oryginalność wyników*

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Stanlika dotyczy jednoznacznie określonego i jasno przedstawionego zagadnienia naukowego związanego ciepłem wydzielanym podczas tarcia w uszczelnieniach stykowych. Uzyskane wyniki można

określić, jako oryginalne, mogące przysporzyć praktyce technicznej informacji umożliwiającej poprawne projektowanie uszczelnień o styku rozproszonym stosowanych w maszynach przepływowych. **O oryginalności pracy świadczy między innymi opracowana przez Doktoranta innowacyjna koncepcja uszczelnienia szczotkowego z elementami bimetalowymi umożliwiającymi jego termoregulację.** Opiniowana rozprawa jest dowodem na to, że Doktorant bardzo dobrze orientuje się w tematyce stykowych uszczelnień ruchowych oraz problemach, jakie dotyczą tego typu uszczelnień.

#### • *Metody badawcze*

Zastosowane w pracy metody badawcze należy ocenić pozytywnie. Doktorant dysponuje bardzo bogatym warsztatem badawczym. Prowadził rozważania z wykorzystaniem metod zarówno analitycznych, numerycznych jak i eksperymentalnych. Przeprowadzone analizy uzyskanych wyników świadczą, że posiada on umiejętność oceny własnych dokonań. **Wśród istotnych osiągnięć Doktoranta należy wymienić opracowanie metody analitycznego określania nacisku pomiędzy uszczelnieniem z elementami bimetalowymi a wałem uwzględniającej zmianę temperatury oraz metody określenia temperatury uszczelnienia uwzględniającej współczynnik rozdziału ciepła tarcia.**

#### • *Stopień rozwiązania zagadnienia*

Stopień rozwiązania zagadnienia oceniam pozytywnie. Opisane w rozprawie badania i analizy wyraźnie rozszerzają wiedzę o bardzo złożonym stanie cieplnym występującym w obszarze styku uszczelnienia szczotkowego i wału. **Zwłaszcza analiza zagadnienia sprzężenia zwrotnego pomiędzy temperaturą a odkształceniem elementów uszczelnienia szczotkowego prowadzącego do zmian ich nacisku na powierzchnię wału jest jednym z istotnych osiągnięć Doktoranta.** Do innych osiągnięć należy zaliczyć określenie proporcji rozdziału ciepła generowanego w skutek tarcia pomiędzy elementy uszczelnienia i wał.

Wydaje się, że prezentowana praca powinna być kontynuowana w zakresie badań nad wpływem zastosowania różnych materiałów (np. materiałów polimerowych) w uszczelnieniach szczotkowych na ich trwałość a także temperaturę podczas pracy uszczelnienia. W szczególności należałoby prowadzić badania tribologiczne materiałów węzłów uszczelniających, określające wpływ parametrów ruchowych (nacisk, prędkość ślizgania, temperatura) na współczynnik tarcia i odporność na zużywanie. Wpływie to niewątpliwie na trwałość projektowanych uszczelnień o styku rozproszonym a także polepszy ich szczelność.

• *Wniosek końcowy*

Przedstawiony w ocenianej rozprawie materiał badawczy jest oryginalnym dorobkiem Doktoranta - ma on zarówno walory poznawcze jak i użytkowe. Wymienione wcześniej uwagi i zastrzeżenia nie umniejszają w żadnym stopniu merytorycznej wartości pracy, którą oceniam pozytywnie. Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że rozprawa Pana mgr. inż. Michała Stanclika pt. „Sposoby ograniczania wpływu ciepła tarcia na pracę uszczelnienia o styku rozproszonym” w pełni spełnia wymagania przewidziane w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zmianami Dz. U. z 2005 r. nr 164, poz. 1365). **W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy w dyscyplinie naukowej „Budowa i Eksploatacja Maszyn” i proponuję Radzie Naukowej Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej dopuszczenie jej do publicznej obrony.**



## Załącznik do recenzji

rozprawy doktorskiej p. mgr. inż. Michała Stanlika  
pt. „Sposoby ograniczania wpływu ciepła tarcia na pracę uszczelnienia o styku rozproszonym” zawierający uwagi szczegółowe dotyczące ww. pracy

### Uwagi ogólne

1. W rozdziale 5.2. brakuje odniesienia do miejsca, w którym przedstawiono wyniki obliczeń z wykorzystaniem przedstawionego modelu.
2. Czy w rozdziale 5.3, rys. 5.6 uwzględniono rozszerzalność cieplną materiału, z którego zrobiono druciki w uszczelnieniu szczotkowym?

### Uwagi szczegółowe

(Uwagi podane są w kolejności tekstu (s - strona, w - wiersz, g - od góry, d - od dołu)  
Prosiłbym o wyjaśnienie uwag o wytłuszczonym piśmie)

1. s.9. Proponowałbym stosowanie różnych indeksów do rozróżnienia podobnych oznaczeń dla różnych wielkości (np.  $\alpha$ , n).
2. s.11,w.17d. Jest „... przy bardzo wysokich temperaturach...”. Powinno być „...w bardzo wysokiej temperaturze ...”.
3. s.17 w.7d. Jest „nie wyważonego”. Powinno być „niewyważonego”
4. s.21, w.5g. Jest „z kewlaru”. Powinno być „z Kevlaru”. Kevlar jest nazwą handlową włókna aramidowego produkowanego przez firmę DuPont.
5. s.32, wzór 4.1. Pierwszy we wzorze znak „=” powinien być zastąpiony „≈” ponieważ jak wcześniej stwierdzono energia tarcia nie jest całkowicie rozpraszana w postaci ciepła. Zatem strumień generowanego ciepła w przybliżeniu będzie równy mocy traconej na tarcie.
6. s.39 w.8g. Jest „porównania 9 wybranych serii”. Powinno być „porównania dziewięciu wybranych serii”.
7. **s.44 w.1-2g. Jest „Czynnikami decydującymi o tym, który przypadek wystąpi są nacisk oraz chropowatość.” A co z własnościami mechanicznymi materiału (np. modułem sprężystości, granicą plastyczności itp.)?**
8. s.46,w.13d. Jest „nadwyżka temperatury”. Powinno być „gradient temperatury”
9. s.55. W tytule jest „termo-regulacyjnym”. Powinno być „termoregulacyjnym”
10. s.79, w.2g. Jednostką ciśnienia w układzie SI jest [Pa] a nie [bar].
11. s.82, w.3g. Jest „wynosiła”. Powinno być „wynosiła”
12. s.92. Brak dolnej części tabeli 9.5
13. s.94. W tabeli 9.7 zamieniono miejscem opisy kolumn „Wcisk” i „Prędkość obrotowa”

