

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Sikory pt.:

Analiza wpływu starzenia oleju silnikowego na parametry eksploatacyjne i przepływowe poprzecznego łożyska ślizgowego

Podstawa prawna: zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni z dnia 29 listopada 2019 roku.

Tematyka i cel rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska jest poświęcona problemom łożyskowania ślizgowego a szczególnie problemowi zmian właściwości łożyska ślizgowego pracującego w obszarze tarcia płynnego w wyniku procesów starzenia się oleju smarowego. Praca ma charakter teoretyczno – eksperymentalny. Autor zbadał doświadczalnie własności reologiczne wybranych olejów smarowych a następnie wykonał obliczenia hydrodynamicznych łożysk ślizgowych i poddał analizie wyniki symulacji komputerowych. Rozprawę można zaliczyć do prac zwierających się w obszarze tribologii czyli nauki o tarcu i zużyciu.

Łożyska ślizgowe są podzespołami odpowiedzialnymi. Od ich trwałości i niezawodności zależy bezpieczeństwo środków transportu. Proces projektowania, wykonania i montażu łożysk ślizgowych przy dzisiejszym stanie wiedzy może wydawać się nieskomplikowany. Jednak nieustanne wyężdżanie maszyn oraz wydłużanie okresów pomiędzy przeglądami sprawia, że czasem dochodzi do przedwczesnego zużycia lub poważnych awarii, których usunięcie jest niezwykle kosztowne. Warto też zwrócić uwagę na fakt, że najnowocześniejsze maszyny i urządzenia wymagają specjalistycznego serwisu przez wysokokwalifikowaną kadrę wyposażoną zazwyczaj w wyspecjalizowaną aparaturę. Eksploatujący środki transportu chcąc ograniczyć koszty często rezygnują z autoryzowanego serwisu.

Autor rozprawy jako przedmiot swoich badań wybrał łożysko ślizgowe smarowane przez różne oleje silnikowe o różnym stopniu wyeksploatowania. Oleje poddane badaniom służyły do smarowania następujących silników:

- a) trzech pojazdów osobowych – były to silniki o zapłonie samoczynnym i iskrowym zasilane przez różne paliwa – olej napędowy, benzynę oraz paliwo gazowe LPG,
- b) trzech silników okrętowych średnio obrotowych zainstalowanych na holownikach portowych.

Wymienione powyżej silniki z których pobierano próbki oleju były w różnym stopniu wyeksploatowane – czyli w różnym stanie technicznym.

Tematykę pracy uważam za bardzo aktualną i interesującą. Corocznie na świecie ukazują się setki artykułów związanych z łożyskowaniem części maszyn. Nie znalazłem jednak w literaturze publikacji obejmujących problemy starzenia się oleju kiedy charakterystyka lepkości oleju zaczyna przypominać ciecz nie Newtonowską.

Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w mocno obciążonych łożyskach wyłożonych maszyn kiedy grubości filmu smarnego jest niewielka a częstym problemem może być niewspółosiowość wału i panwi. Problem pogłębia fakt, że w dążeniu do jak najmniejszych strat energetycznych układów przeniesienia mocy podejmuje się próby stosowania czynników smarnych o niskiej lepkości. Grubości filmów smarnych są wówczas zazwyczaj niewielkie a zapas nośności hydrodynamicznej znikomy. Spadek lepkości takiego czynnika smarnego w funkcji czasu eksploatacji może doprowadzić do sytuacji kiedy w łożysku nie powstanie film smarny o dostatecznej nośności, dojdzie to tarcia mieszanego i szybkiego zużycia skojarzenia ślizgowego.

Autor rozprawy w moim zdaniem imponujący, świadomy sposób posługuje się złożonymi modelami matematycznymi rozbudowując na swoje potrzeby klasyczną teorię hydrodynamicznego smarowania o zagadnienia cieplne. Jest to moim zdaniem szczególnie wartościowe gdyż dzisiaj, szczególnie młodszy naukowcy ulegają pokusie stosowania w swoich badaniach oprogramowania komercyjnego takiego jak pakiety Ansys, Nastran czy Abaqus często tracąc kontrolę nad złożonym aparatem matematycznym jaki zawierają te nowoczesne narzędzia.

Jak widać z powyższego, tematyka opiniowanej rozprawy jest współcześnie bardzo ważna zarówno od strony czysto aplikacyjnej jak i od strony poznawczej. Podjęcie tej tematyki w rozprawie doktorskiej uważam za uzasadnione i celowe.

We wstępie na stronie 8, pisząc o awariach łożysk ślizgowych, doktorant napisał:

„Po części awarie te wynikają z błędnego zaprojektowania węzła tarcia ślizgowego lub złym dobozem oleju, jednak w głównej mierze awarie te są spowodowane nieprawidłową eksploatacją. Dlatego właśnie analiza wpływu nienewtonowskich właściwości starzenia się oleju na parametry przepływowe i eksploatacyjne jest w stanie poprawić stan wiedzy na ten temat oraz pomóc w monitorowaniu stanu oleju i węzłów tarcia ślizgowego.” uważam to za roboczą hipotezę pracy i główny problem badawczy.

Na stronie 26 doktorant sformułował tezę rozprawy w następujący sposób:

„Zmiany lepkości dynamicznej oleju, związane z jego starzeniem oraz wpływem szybkości ścinania, ciśnienia i temperatury mają znaczący wpływ na parametry eksploatacyjne i przepływowe poprzecznych łożysk ślizgowych”

Tak zapisany cel rozprawy stanowi prawidłowo postawione zadanie naukowe, którego rozwiązaniem powinna być, w myśl wymagań ustawowych, każda rozprawa doktorska.

Ocena strony formalnej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje 156 stron tekstu w języku polskim i jest podzielona na dziesięć rozdziałów, uzupełnionych spisem oznaczeń, wykazem literatury oraz abstraktem w języku angielskim.

Pierwszy rozdział zawiera wstęp i motywację do podjęcia badań w tematyce rozprawy. W tym rozdziale znajduje się większość odwołań do niezwykle licznej, bo zawierającej aż 256 pozycji literatury.

W drugim rozdziale przedstawiono charakterystykę obiektu badań. Opisano model teoretyczny hydrodynamicznego łożyska ślizgowego, geometrię szczeliny smarowej oraz model cieplny łożyska.

W rozdziale trzecim doktorant opisał podstawowe równania hydrodynamicznej teorii smarowania, ubezwymiarowanie równań, warunki brzegowe itp.

W rozdziale czwartym opisano badania eksperymentalne właściwości reologicznych olejów.

Rozdział piąty zawiera opis sposobu modelowania lepkości oleju w funkcji temperatury, ciśnienia, szybkości ścinania oraz okresu eksploatacji.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki obliczeń hydrodynamicznych łożysk ślizgowych smarowanych olejami różnych rodzajów o różnym stopniu zużycia.

W rozdziale siódmym przedstawiono wnioski końcowe.

Opisana powyżej struktura opiniowanej rozprawy jest moim zdaniem przejrzysta, logiczna i odpowiednia dla prac naukowych. Praca jest napisana w dobrym i zrozumiałym językiem, przy wykorzystaniu prawidłowej terminologii technicznej. Opracowanie edytorskie rozprawy jest dobre.

Ocena zawartości naukowej rozprawy

Zasadniczym elementem naukowym opiniowanej rozprawy jest model obliczeniowy opierający się na hydrodynamicznej teorii smarowania. Sam model obliczeniowy jest znany i stosuje się go od lat. Jest on szeroko opisany w literaturze cytowanej przez doktoranta. Doktorant rozbudował model obliczeniowy o zagadnienia cieplne przyjmując model obliczeniowy nieizotermiczny (str. 33).

Doktorant jako przedmiot swoich badań przyjmuje łożysko ślizgowe smarowane przez olej silnikowy. W opisywanym przez autora rozprawy przypadku poddanym analizie olej smarowy doprowadzany jest przez kanalik wewnątrz wału korbowego dlatego doktorant przyjął, że temperatura zasilania równa się temperaturze wału.

Problemem nie zbadanym do dziś jest zmiana właściwości reologicznych oleju smarowego w czasie eksploatacji silnika spalinowego. Dlatego doktorant przeprowadził badania eksperymentalne właściwości reologicznych olejów wykonano wykorzystując reometr renomowanej firmy Thermo Scientific. Urządzenie to o modułowej konstrukcji ma szerokie możliwości pomiarowe. Na podstawie uzyskanych danych z pomiarów eksperymentalnych lepkości w funkcji temperatury, ciśnienia i prędkości ścinania doktorant zamodelował charakterystyki lepkościowe badanych olejów – czyli lepkości w funkcji temperatury, ciśnienia, prędkości ścinania oraz okresu eksploatacji.

W kolejnej części rozprawy doktorant opisuje plan eksperymentu numerycznego przedstawiając w tabeli 6.1. przyjmowane założenia w kolejnych symulacjach. Na kolejnych stronach rozprawy doktorant prezentuje wyniki obliczeń i wyciąga wnioski. Wykazuje, że zgodnie z przewidywaniem i wynikami obliczeń innych badaczy uwzględnienie zmian lepkości w funkcji temperatury, ciśnienia oraz szybkości ścinania powoduje spadek nośności łożyska o około 60%. Najważniejsze jest jednak moim zdaniem to, że uwzględnienie zmian właściwości oleju będących rezultatem procesów starzenia oleju powoduje spadek nośności o kolejne 20%.

W rozdziale siódmym autor dokonał podsumowania wyników oraz odnosi się do postawionej na początku tezy.

Oceniając wyżej opisaną zawartość naukową opiniowanej rozprawy należy podkreślić co następuje:

- doktorant wykazał się bardzo dobrym opanowaniem aktualnej wiedzy z hydrodynamicznej teorii smarowania,
- doktorant zbudował model teoretyczny analizowanego łożyska uwzględniając złożone właściwości reologiczne oleju smarowego,
- doktorant potrafi posłużyć się nowoczesną aparaturą do badania własności reologicznych olejów smarowych.

Cel pracy sformułowany przez doktoranta we wstępnej części rozprawy czyli zbadanie wpływu właściwości reologicznych na własności hydrodynamicznego łożyska ślizgowego został tym samym osiągnięty – doktorant prawidłowo rozwiązał postawione przed nim zadania naukowe, a jego rozwiązanie zawiera istotne elementy oryginalne i co uważam za ważną pracę wnosząca istotne informacje praktyczne, które można uwzględnić na etapie prac projektowych.

Uwagi krytyczne

Wobec mojej generalnie pozytywnej oceny opiniowanej rozprawy zamieszczone poniżej uwagi krytyczne dotyczą spraw mniejszej wagi i tej oceny w żadnym stopniu nie zmieniają:

- Podstawowy rysunek przedstawiający łożysko pracujące w warunkach tarcia płynnego – rys. 2.1. strona 32, przedstawiający łożysko ślizgowe pracujące w obszarze tarcia płynnego. Nie oznaczono minimalnej grubości filmu smarnego oraz jego kąтового położenia co ma kluczowe znaczenie dla rozkładu ciśnienia. Co więcej nie pokazano również λ – czyli ekscentryczności (skazano jedynie środek wału i panwi) mimo tego, że w dalszej części rozprawy praktycznie wszystkie wyniki prezentowane są jako funkcja λ – czyli ekscentryczności. Na rysunku pokazano kąt χ – nie opisano go w tekście (komentarz jest dopiero na stronie 94), chodzi o bardzo istotny parametr wiązany z niewspółosiowością, której w pracy doktorant nie bierze pod uwagę, dopiero później przyjmuje $\chi=0$. Przekrój oznaczony jako A-A jest niewłaściwie wykonany (chodzi o ukazaną grubość szczeliny smarowej, która nie odpowiada miejscu przecięcia).
- Rozkład temperatury w filmie smarnym – strona 33. Rozumiem z opisu, że doktorant uwzględnia w obliczeniach promieniową zmianę temperatury w filmie olejowym. Nie widać tego na wykresach temperatury np. rys. 6.1. Wcześniej spotykałem się z

powszechnie przyjmowanym założeniem, że w cienkim filmie smarnym w kierunku promieniowym temperatura i ciśnienie są stałe. Nie znalazłem wyjaśnienia w tekście tej wątpliwości.

- Opis analizowanego łożyska str. 94. Podano między innymi wymiary łożyska. Z jakiego silnika pochodzi to łożysko czy jest to obiekt hipotetyczny? Wymiary podane przez autora to na przykład promień czopa a prędkość obrotową podano w rad/s. Uważam, że opisując obiekt rzeczywisty powinno się podać rzeczywistą – mierzoną średnicę a prędkość obrotową w obrotach na sekundę lub obrotach na minutę. Przyjęty przez doktoranta promieniowy luz łożyskowy to 0,107 mm a średnica czopa wynosiła 135 mm. Nie znalazłem w pracy wyjaśnienia jak dobrano luz łożyskowy oraz czy jest on w stanie „zimnym” czy uwzględniono rozszerzalność termiczną? Czym kierowano się dobierając wielkość luzu łożyskowego?
- Wszystkie zaprezentowane w pracy wyniki obliczeń są przedstawione w wartościach bezwymiarowych. Żałuję, że nie zaprezentowano chociaż jednego przypadku w wartościach wymiarowych tym bardziej, że analizowano konkretne łożysko o podanych w pracy wymiarach.
- Prezentowane wyniki symulacji wykonywano dla różnych wielkości ekscentryczności λ z zakresu od 0,1 do 0,9, nie znalazłem jednak w pracy informacji o wartościach minimalnej dopuszczalnej grubości filmu smarnego dla którego łożysko ma maksymalną nośność hydrodynamiczną. Jaka więc jest maksymalna dopuszczalna ekscentryczność dla analizowanego łożyska?
- Porównywanie wyników symulacji do wyników obliczeń dla modelu kiedy przyjmowano stałą lepkość uważam, za niepotrzebne, powszechnie wiadomo, że model izotermiczny dla czynnika smarnego takiego jak olej jest nie właściwy ze względu na znaczące zmiany lepkości w filmie smarnym zależne głównie od temperatury.

Wykresy rozkładu ciśnienia prezentowane w pracy (np. rys. 6.5) uważam za nie dostatecznie czytelne. Zastosowany kolor niebieski w wydrukowanej pracy jest jednolity. Uważam, że bardziej stosowne były by wykresy w funkcji rozwiniętej mapy ciśnienia obciążonej dolnej połowy panwi. Na wykresach dostrzec można, że początek generowania się nośnego filmu smarnego zależy od obciążenia łożyska (więc od wynikającego z niego λ – czyli ekscentryczności) Zastanawiający jest fakt dlaczego film smarny kończy się zawsze w podobnym miejscu? Autor rozprawy poświęca temu

zagadnieniu kilka stron. Trudno to jednak zweryfikować gdyż nie podał kąтового położenia minimalnej grubości szczelny smarowej.

- Rozkład temperatury w filmie – na przykład rys. 6.1. - nie widać stałej dla wszystkich analizowanych przypadków temperatury zasilania – przyjmowanych przez autora jako temperatura wału korbowego.
- Za słabą stroną przyjętego modelu obliczeniowego uważam nie uwzględnienie deformacji sprężystej panwi związanej z rozkładem ciśnienia hydrodynamicznego oraz deformacji termicznej.

Wniosek końcowy

W podsumowaniu chciałbym stwierdzić, że praca mgr inż. Grzegorza Sikory pt. „Analiza wpływu starzenia oleju silnikowego na parametry eksploatacyjne i przepływowe poprzecznego łożyska ślizgowego” spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i według mnie może być dopuszczona do publicznej obrony.