

Poznań, dnia 15.07.2022

Dr hab. inż. Paweł Twardowski, prof. PP
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Politechnika Poznańska
pl. Mari Skłodowskiej-Curie 5
60-965 Poznań

R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Muszyńskiego

pt.

Straty mocy w łożyskach tocznych obrabiarek High Speed Cutting

Podstawa opracowania

- praca doktorska mgr inż. Mateusza Muszyńskiego, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Jan Kosmol, Politechnika Śląska,
- pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak, z dnia 27.05.2022 roku w sprawie opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Muszyńskiego.

Ogólny opis pracy

Opiniowana praca doktorska dotyczy analizy strat mocy w łożyskach tocznych obrabiarek szybkoobrotowych. Problematyka jest istotna i aktualna z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia.

Praca liczy 153 strony. Składa się ze wstępu poprzedzonego spisem treści i wykazem ważniejszych oznaczeń, oraz 8 rozdziałami zasadniczymi (rozd. 2 – 9), podsumowaniem i kierunkami dalszych badań (rozd. 10), streszczeniem i wykazem literatury. Wykaz literatury obejmuje 114 pozycji.

Pan mgr inż. Mateusz Muszyński wykonał pracę doktorską pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Jana KOSMOLA na Wydziale Mechaniczny Technologiczny Politechniki Śląskiej.

Uważam, że przedstawiona do opiniowania praca stanowi opracowanie w zakresie określonym tematem podjętym przez Autora.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 22.08.2022.
154151/2022.
nr zat.

Ocena merytoryczna

Autor w pracy podjął się analizy straty mocy w łożyskach tocznych obrabiarek do obróbki z wysokimi prędkościami skrawania.

We wstępie Autor przedstawił na czym polega problem, którym się zajął i krótko scharakteryzował problemy jakie występują w trakcie eksploatacji elektrowrzecion. Szczególną uwagę zwrócił na łożyskowanie elektrowrzecion jako jeden z newralgicznych punktów współczesnych obrabiarek HSM. Krótko przedstawił problemy z tym związane w postaci odkształceń spowodowanych siłami działającymi na elektrowrzeciono oraz czynnikiem termicznym, mającym zasadnicze znaczenie w trakcie eksploatacji.

W rozdziale 2 (Analiza doniesień literaturowych) Autor na podstawie literatury opisał szczegółowo, na czym polega problem, którym się zajął. Na początku rozdziału dokonał przeglądu historycznego łożyskowania wrzecion, począwszy od końca XIX wieku, podsumowując w tabeli 2.1 jakie są obecnie konfiguracje łożysk skośnych we wrzecionach obrabiarek. Następnie Autor scharakteryzował typy napięć wstępnych kulkowych łożysk skośnych i przeszedł do modelowania oporów ruchu i strat mocy. W tej części opisuje m.in. siły kontaktowe, które oznacza literą Q . W nomenklaturze międzynarodowej siły najczęściej oznaczane są jako F , bez względu z jakimi siłami mamy do czynienia. Skąd więc oznaczenie Q ? W dalszej części rozdziału Autor opisuje zjawisko tarcia tocznego i zjawisko spinu w odniesieniu do pojedynczej kulki łożyska skośnego. Następnie opisany jest proces modelowania sił kontaktowych dla sztywnego napięcia wstępnego, modelowania sił kontaktowych dla sprężystego napięcia wstępnego oraz rozszerzony model kontaktowy. Na stronie 26 Autor przedstawił cytowania w formie obecnie nieakceptowalnej. W jednym nawiasie kwadratowym cytuje 17 pozycji literaturowych. Taki sposób cytowania nie tylko jest nieelegancki, ale i niekiedy nieakceptowalny. Tego typu cytowania należy unikać. Analiza literatury kończy się modelowaniem pola temperatury i odkształceń cieplnych elektrowrzecion i na koniec podsumowaniem. Na stronie 33 pojawiły się znowu cytowania „zbiorowe” – 10 i 18 pozycji w nawiasie kwadratowym. W tytule rozprawy doktorskiej wyraźnie jest powiedziane, że chodzi o obrabiarki z grupy tzw. HSM. W analizie literatury Autor w ogóle nie porusza tego problemu, nie rozgranicza obrabiarek konwencjonalny od obrabiarek HSM. Obecnie elektrowrzeciona występują także w obrabiarkach „konwencjonalnych”. Celowe wydawałoby się dokonać osobnej analizy w odniesieniu do obrabiarek *High Speed Cutting*, dla których dominują łożyska hybrydowe.

Reasumując, bez względu na uwagi krytyczne, rozdział ten opracowany jest poprawnie tzn. została przeprowadzona analiza doniesień literaturowych a nie przegląd literatury, jak to często bywa.

W rozdziale 3 (Cel i zakres pracy) zdefiniowano podstawowy cel pracy i podano siedem celów szczegółowych osiągnięcie których jest niezbędne do osiągnięcia zamierzonego efektu. Cel pracy zdefiniowany jest prawidłowo i nie wymaga uzupełnień.

Omawiając zakres pracy Autor krótko scharakteryzował co znajduje się w kolejnych rozdziałach. Bardziej przypomina to rozbudowane streszczenie a nie omówienie zakresu pracy.

TCS

Rozdział 4 (Modelowanie sił kontaktowych) podano, że do badań przyjęto dwa łożyska szybkoobrotowe firmy FAG. Podano jednak tylko parametry geometryczne bez dopuszczalnego obciążenia znamionowego czy dopuszczalnej prędkości obrotowej. W obrabiarkach HSM bardzo często spotkać można łożyska hybrydowe, gdzie kulki wykonane są np. z ceramiki azotkowej Si_3N_4 . Z informacji katalogowych wynika, że zastosowane przez autora łożyska są wykonane ze stali łożyskowej. Szkoda, że Autor nie zaproponował analizy dotyczącej łożysk hybrydowych.

W rozdziale tym przeanalizowano zależności kinematyczne i obciążenia kulek łożyska, współczynnik sztywności kontaktowej kulki z bieżnią, oraz przedstawiono model sił kontaktowych dla sztywnego napięcia wstępnego. Na wykresach 4.8 – 4.10 pokazano wpływ prędkości obrotowej na kąty działania łożyska, siły kontaktowe i siłę osiową działającą na łożysko. Analiza ta dotyczy prędkości obrotowych $n < 34000$ obr/min. Z czego wynika ten zakres analizy prędkości obrotowej? Współczesne obrabiarki HSM posiadają elektrowrzeciona o znacznie większym zakresie prędkości obrotowych, np. *DMG MORI HSC 20 linear* $n_{max} = 60000$ obr/min, *MIKRON MILL S 400* $n_{max} = 50000$ obr/min. Z tego powodu nasuwa się pytanie, dlaczego analizy przeprowadzono tylko do 34000 obr/min?

W dalszej części rozdziału Autor analizuje sprężyste odkształcenie ruchomego pierścienia oraz przedstawia model sił kontaktowych dla sztywnego napięcia wstępnego – jako model rozszerzony i model sił kontaktowych dla sprężystego napięcia wstępnego – jako model klasyczny. Podobnie jak wcześniej model analizowany jest w zakresie prędkości obrotowej $n < 34000$ obr/min. Dalsza część rozdziału dotyczy kolejnych wersji modelu sił kontaktowych oraz badania symulacyjne z wykorzystaniem MES.

Rozdział 5 (Modelowanie oporów ruchu łożysk) dotyczy modelowania oporów ruchu łożyska jako moment oporu, który jest składową kilku czynników. W pierwszym zdaniu rozdziału 5 Autor pisze „Straty mocy można wyznaczyć poprzez analityczne obliczenie lub pomiar oporów ruchu”. Po analitycznym obliczeniu musi nastąpić weryfikacja doświadczalna, czyli pomiar oporów ruchu. Zastosowanie spójnika „lub” jest w tym przypadku niefortunne (powinno być „i”). Każdy model teoretyczny musi być potwierdzony doświadczalnie, w przeciwnym wypadku nasuwają się wątpliwości dotyczące jego poprawności. Na rysunku 5.1 pokazano model tarcia tocznego kulki w łożysku, a następnie przeprowadzono analizę. Znowu nasuwa się to samo pytanie, dlaczego Autor przeprowadził analizę w zakresie $n < 34000$ obr/min? Rozdział kończy się przedstawieniem modelu analitycznego całkowitego momentu oporu ruchu łożyska.

Rozdział 6 (Eksperymentalne badania współczynnika sztywności kontaktowej) przedstawiono stanowisko badawcze do wyznaczenia sztywności kontaktu kulka – płaszczyzna. W tym momencie nasuwa się pytanie czy próby doświadczalne przeprowadzone w stanie statycznym odzwierciedlają warunki, gdy kulka łożyska wprawiona jest w ruch obrotowy? Poza tym czujnik przemieszczeń Sylvac (biorąc pod uwagę jego sposób zamocowania) nie uwzględnia odkształceń sprężystych płytek hartowanych 9 i 10. Być może nie ma to znaczenia, ale należałoby się do tego ustosunkować. Patrząc na wyniki pokazane na rysunku 6.4 wynika, że doświadczenie zostało przeprowadzone poprawnie. W tym momencie należy zadać pytanie, ile razy powtórzono doświadczenie? Czy nie jest to czasem przypadek? Gdyby

Tier

doświadczenie przeprowadzono kilkakrotnie to należy uznać, że weryfikacja doświadczalna jest prawidłowa.

W 7 rozdziale Autor przedstawił eksperymentalne badania oporów ruchu łożysk. Na początku rozdziału Autor podaje, że „*najbardziej adekwatnym sposobem weryfikacji modeli analitycznych jest przeprowadzenie doświadczalnych badań oporów ruchu łożysk*”. Założenie to jest jak najbardziej poprawne i zgodne ze „sztuką” inżynierską. W opisie pojawiła się drobna nieścisłość, gdy Autor piezoelektryczny czujnik siły (wg. Firmy Kistler – czujnik siły – typ 9102A) nazywa wkładka piezoelektryczna. W dalsze części Autor prezentuje wyniki wpływu siły na ugięcie gumowej podkładki (rys. 7.3) opisując je wielomianem 4 stopnia. Stosowanie wielomianów dowolnego stopnia (powyżej stopnia 3) jest bardzo dyskusyjne. Wynika to z tego, że wielomiany stopnia wyższego niż 3 są w stanie opisać większość zależności przyczynowo skutkowych (gdy nie występuje czynnik losowy) ale dotyczą one tylko tego szczególnego przypadku i trudno tu mówić o jakimkolwiek uogólnieniu wyników. Przebieg pokazany na rysunku 7.3 można opisać innymi funkcjami a wielomian 4 stopnia jest najmniej zasadny. Koncepcja i schemat stanowiska badawczego do pomiaru momentu oporu ruchu łożysk (rys. 7.4) i tory pomiarowe (rys. 7.5) jest prawidłowy i nie wymaga komentarza. Na rysunku 7.6 Autor przedstawia przykładowy przebieg momentu oporu, podając, że interpretacja przebiegu momentu oporu jest trudna. W zasadzie nie jest trudna, przebieg jest dość typowy i zamiast stosować algorytm średniej ruchomej wystarczyłoby zastosować odpowiednie filtry, co w takich przypadkach jest standardowe. Dlaczego Autor nie zastosował odpowiednich filtrów? W takiej sytuacji aż się prosi zastosowanie filtrów dolnoprzepustowych. W dalszej części Autor przedstawia wyniki badań oporów ruchu łożysk skośnych a uzyskane wyniki pokazano na odpowiednich wykresach. Analiza dotyczy wyników dla prędkości obrotowej $n < 12000$ obr/min. Autor podaje, że „*prędkości ograniczone zostały ze względu na możliwości stanowiska badawczego i względy bezpieczeństwa*”. Jak to się ma do tytułu rozprawy doktorskiej? Skoro Autor zajmuje się obrabiarkami HSM to powinien zadbać o taki tor pomiarowy, który umożliwi badanie łożysk w tym zakresie. Jak pogodzić weryfikację doświadczalną z tytułem pracy doktorskiej? W dalszej części pracy Autor przeprowadza weryfikację modeli analitycznych oporów ruchu. W badanym zakresie wyniki modeli analitycznych są zbliżone do otrzymanych wyników doświadczalnych co świadczy o poprawności modeli analitycznych. Zaleca się jednak na przyszłość nie stosować średniej ruchomej a zamiast tego zastosować odpowiednie filtry – to nie to samo.

Rozdział 8 (Modelowanie strat mocy, rozplywu ciepła i rozkładu pola temperatur) W rozdziale tym zaprezentowano wyniki uzyskane w oparciu o badania symulacyjne metodą MES. W pierwszej części szczegółowo przedstawiono sprzężony model cieplno – mechaniczny, przedstawiając m.in. wyniki badań pola temperatury wrzeciona i zmian sił osiowych dla sztywnego napięcia wstępnego. Analiza przeprowadzona jest wnikliwie i starannie a uzyskane wyniki są obiecujące. Na rysunku 8.9 Autor przedstawił tok postępowania modelowania pola temperatur uwzględniając różna czynnik mające wpływ na to pole. W kolejnej części rozdziału pokazano wyniki cieplnych badań symulacyjnych (rozd. 8.2) Na rysunkach 8.12 – 8.15 pokazano moment oporu ruchu łożysk wraz z temperaturą pierścienia zewnętrznego. Czy temperatura to wynik symulacji czy pomiaru?. Następnie pokazano w funkcji prędkości mo-

Twid.

ment w stanie ustalonym (rys. 8.16 i 8.17), temperaturę wybranych punktów stanowiska (rys. 8.20 i 8.30), względne osiowe przemieszczenia pierścieni łożyska (rys. 8.22) i przemieszczenia wywołane odkształceniami cieplnymi (8.23). Rozdział kończy się analizą wartości momentu oporu łożyska w stanie ustalonym cieplnie dla dwóch sposobów modelowania (rys. 8.26). W podsumowaniu rozdziału Autor słusznie zauważył, że pominięcie odkształceń cieplnych łożyska i takich elementów jak wał i tuleja dystansowa prowadzi do błędów w oszacowaniu momentu oporu ruchu łożysk.

Ostatni rozdział 9 (Eksperymentalne badania cieplne) miał na celu weryfikację badań symulacyjnych. Znowu pojawił się ten sam komentarz co poprzednio, że do badań przyjęto prędkości obrotowe do $n=10000$ obr/min ze względu bezpieczeństwa i to, że silnik nie pozwalała na długotrwałą pracę z większymi prędkościami. Jakie wg. Autora mogły wystąpić potencjalne „niebezpieczeństwa”? Skoro silnik nie pozwalała na długotrwałą pracę należało zaopatrzyć się w taki który to umożliwiał. Z tego powodu badania symulacyjne zostały zweryfikowane w zakresie 30% badanej prędkości obrotowej n . W rozdziale 9.1 Autor przedstawia wyniki eksperymentalne badań cieplnych łożysk komentując uzyskane zależności. Wyniki są ciekawe i wartościowe jak np. różne czasy ustalenia temperatury w zależności od prędkości obrotowej. Następnie w rozdziale 9.2 pokazano wyniki dotyczące weryfikacji modelu cieplno – mechanicznego. Uzyskano dość dużą zgodność pomiędzy wartościami symulacyjnymi a wartościami rzeczywistymi. Wyniki jak ich analiza są poprawne i nie budzą zastrzeżeń.

Podsumowanie i wnioski przedstawione w rozdziale 10 potwierdzają osiągnięcie założonego celu i nie budzą zastrzeżeń pod względem merytorycznym i formalnym. Jedyne wątpliwości jakie się nasuwają to zakres prowadzonej analizy dla prędkości obrotowej $n < 34000$ obr/min, dla części analitycznej i $n < 10000$ obr/min dla części doświadczalnej.

Ponadto wydaje się, że forma wniosków w postaci wypunktowanych krótkich akapitów byłaby bardziej czytelna, ale to jest w gestii Autora.

Ocena redakcyjna

Praca doktorska mgr inż. Mateusza MUSZYŃSKIEGO stanowi kompletne opracowanie naukowe zgodne z tematem określonym w tytule, logiczne pod względem struktury, podziału treści, kompletności celów i wniosków końcowych.

Autor stosuje w pracy poprawną terminologię oraz jednostki układu SI.

Silną stroną pracy są bardzo starannie opracowane rysunki, ilustracje i schematy, co powoduje, że praca jest czytelna i zrozumiała. Z edytorskiego punktu widzenia przygotowana jest bardzo dobrze. Analizując całość trudno było znaleźć błędy redakcyjne lub stylistyczne. Bardzo rzadko występowały błędy typu „literówki”.

Nie znaleziono poważnych błędów dotyczących poprawności języka polskiego, być może ich nie ma, albo Recenzent je przeoczył.

Uwaga końcowa dotyczy wykazu literatury, który ułożony jest w sposób dla Recenzenta niezrozumiały. Spis nie jest uporządkowany ani alfabetycznie, ani w kolejności cytowani. Jakim kryterium kierował się Autor robiąc to w taki a nie inny sposób? Cytowana literatura

Tłoc.

dobrana jest prawidłowo, choć niektóre pozycje podane są w sposób na tyle skrótowy, że trudno je odnaleźć (poz. 103 – 114). Jeśli informację zaczerpnięte były z Internetu to należało podać adres i datę skorzystania z danej strony.

Wartość naukowa i przydatność praktyczna pracy

Problemem naukowym rozwiązany w pracy doktorskiej Pana mgr inż. Mateusza MUSZYŃSKIEGO było opracowanie modelu oporów ruchu kulkowych łożysk skośnych stosowanych w elektrowrzecionach obrabiarek. W tak określonym obszarze zagadnienie zostało przez Autora rozwiązane prawidłowo.

Podjęta tematyka w pracy jest trafna i ma duże znaczenie praktyczne. Wybór tematyki pracy w aspekcie praktycznej przydatności osiągniętych rezultatów, jest słuszny.

Problematyka którą zajął się Autor jest rozwijana przez różne ośrodki naukowo-badawcze i dotyczy nie tylko skośnych łożysk kulkowych ale także łożysk hybrydowych w których kulki bardzo często wykonane są z materiałów ceramicznych. Opracowane przez Autora modele pozwolą lepiej zrozumieć omawiane zagadnienia a także przewidywać zachowanie się łożysk podczas pracy, jak np. przemieszczenia termiczne. Ma to bardzo istotne znaczenie w kontekście rozwijających się trendów w obróbce skrawaniem jak mikroobróbka, obróbka precyzyjna czy obróbka hybrydowa. We wszystkich tych przypadkach właściwości i zachowanie się elektrowrzecion łożyskowanych w kulowych łożyskach skośnych ma znaczenie priorytetowe.

Dalsze rozwijanie prac w podjętym przez Autora kierunku, już w krótkim czasie powinno zaowocować konkretnymi aplikacjami przemysłowymi.

Wniosek końcowy

Przedstawiona do opiniowania praca doktorska mgr inż. Mateusza MUSZYŃSKIEGO wykazała, że Autor ma właściwe rozeznanie naukowej problematyki w zakresie objętym dysertacją, tj. znajomość aktualnej wiedzy teoretycznej i praktycznej oraz metod badawczych.

Kandydat rozwiązał problem naukowy polegający na opracowaniu modelu oporów ruchu kulkowych łożysk skośnych, uzyskując obiecujące rezultaty.

Na tej podstawie stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Mateusza MUSZYŃSKIEGO pt. „Straty mocy w łożyskach tocznych obrabiarek High Speed Cutting” spełnia wymagania zawarte w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, tj. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 w związku z art. 179 ust 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, tj. Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm. i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Recenzja