

Kraków, 2022-09-12.

**Prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj**

**POLITECHNIKA KRAKOWSKA**  
**Wydział Mechaniczny – KRAKÓW**

**PAŃSTWOWA WYZSZA SZKOŁA ZAWODOWA**  
**Instytut Techniczny – NOWY SĄCZ**

## **RECENZJA**

pracy doktorskiej pt.:

**Straty mocy w łożyskach tocznych obrabiarek *High Speed Cutting***

*Autor:* mgr inż. Mateusz Muszyński

**Promotor:** prof. dr hab. inż. Jan Kosmol

Podstawa opracowania recenzji: Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna  
Politechniki Śląskiej

### **1. CHARAKTERYSTYKA PRACY**

Aktualnym trendem rozwojowym w przemyśle maszynowym związanym z obróbką skrawaniem jest dążenie do wzrostu wydajności i dokładności obróbki. W obróbce skrawaniem wydajność i dokładność są ściśle związane z możliwościami obrabiarki i narzędzia. Dlatego szybkie i dokładne wykonywanie przedmiotów wymaga wykorzystania nowoczesnych obrabiarek składających się z wysokiej jakości podzespołów takich jak elektrowrzeciona, narzędzia wykonane z nowoczesnych materiałów, układy pomiarowe o dużej dokładności czy prowadnice toczne.



Technologią ściśle związaną z dużą wydajnością i dokładnością w odniesieniu do konwencjonalnej obróbki skrawaniem jest tzw. High Speed Cutting (HSC), inaczej nazywane High Speed Machining (HSM). Obróbkę HSC charakteryzuje duża prędkość skrawania, której uzyskanie przy równoczesnym zapewnieniu dużej dokładności ruchów jest możliwe tylko przez zastosowanie wysokiej jakości elektrowrzecion. Wnikliwe badania elektrowrzecion są prowadzone w wielu ośrodkach a ich celem zwykle jest określenie ich właściwości cieplnych, dynamicznych czy też sztywności. Kluczowymi elementami nowoczesnych elektrowrzecion są łożyska. Najczęściej stosowane są jednorzędowe kulkowe łożyska skośne, co wynika z faktu, że pozwalają one na przeniesienie znacznych obciążeń zarówno w kierunku promieniowym jak i osiowym. Ponadto charakteryzują się stosunkowo dużą sztywnością osiową i promieniową i mogą być montowane w sposób bezluzowy co zapewnia uzyskanie niewielkich oporów, dużych prędkości obrotowych i zadowalającą dokładność ruchu. W zależności od wymaganych prędkości obrotowych i wielkości obciążeń zewnętrznych stosowane są też do celów łożyskowania elektrowrzecion inne łożyska toczne; takie jak łożyska kulkowe poprzeczne czy łożyska walcowe. Stosownie do cytowanych przez Autora danych literaturowych badania **elektrowrzecion** często dotyczą takich zagadnień jak; łożyskowanie wrzecion, napięcie wstępne kulkowych łożysk skośnych, modelowanie oporów ruchu i strat mocy kulkowych łożysk tocznych z uwzględnieniem: tarcia tocznego, zjawiska spinu, modelowania sił kontaktowych dla sztywnego i sprężystego napięcia wstępnego czy rozszerzonych modeli kontaktowych oraz modelowania pola temperatury i odkształceń cieplnych.

Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, że problematyka związana z modelowaniem oporów ruchu i strat mocy kulkowego łożyska skośnego jest wciąż aktualna i niekompletna bo opisywany klasyczny model łożyska nie odzwierciedla w pełni warunków jego pracy. I tak w literaturze :

- nie ma kompletnych danych dotyczących wpływu prędkości obrotowej na odkształcenia sprężyste pierścieni łożyskowych, a w konsekwencji na siły kontaktowe, kąty działania i opory ruchu, a tylko w nielicznych pracach uwzględniono to odkształcenie, ale przyjęte modele obliczeniowe dotyczą swobodnego rozszerzania pierścienia, które w rzeczywistości jest ograniczone przez kulki.

- nie ma danych o zmienności składowej osiowej siły działającej na łożysko w wyniku sprężystego napięcia wstępnego, a tym samym i wpływu tej siły na opory ruchu. W dotychczasowych pracach przyjmowano, że dla łożysk napinanych przy pomocy sprężyn ta siła jest niezmienna i nie zależy od prędkości obrotowej.



- można znaleźć dane o ilości ciepła powstającego w łożysku, ale prawie brak jest informacji o wpływie tego ciepła na zmiany wymiarów geometrycznych łożyska, a przez to na opory ruchu.

## **2. CEL I ZAKRES PRACY**

Podstawą do poprawnego sformułowania celu i określenia jej zakresu pracy były wyniki analizy literatury, która przede wszystkim obejmowała: sposoby łożyskowania wrzecion obrabiarek ze szczególnym naciskiem na kulkowe łożyska skośne, sposoby realizacji napięcia wstępnego oraz model oporu ruchu tych łożysk, klasyczny sposób modelowania sił kontaktowych w przypadku napięcia wstępnego sztywnego i sprężystego.

### **2.1. Cel pracy**

Głównym celem opiniowanej pracy sformułowanym w oparciu o analizę danych literaturowych było opracowanie matematycznego modelu wielkości strat mocy w szybkoobrotowych kulkowych łożyskach skośnych stosowanych w elektrowrzecionach obrabiarek. Ilość wydzielającego się ciepła w elektrowrzecionach jest istotna z punktu widzenia wielkości odkształceń cieplnych a tym samym poprawności działania obrabiarki i dokładności obróbki. W związku z tym, podjęcie prac badawczych związanych z modelowaniem strat mocy w łożyskach jest uzasadnione. Możliwość oszacowania strat mocy w łożyskach pozwala na projektowanie wysokiej jakości elektrowrzecion oraz ich układów chłodzących i systemów smarowania łożysk.

Osiągnięcie głównego celu pracy wymagało realizacji następujących celów szczegółowych:

- opracowania analitycznych modeli sił kontaktowych w łożysku,
- przeprowadzenia analitycznych i symulacyjnych badań wpływu sposobu realizacji napięcia wstępnego, wielkości tego napięcia i prędkości obrotowej łożyska na wartości sił kontaktowych,
- przeprowadzenia analitycznych badań wpływu sposobu realizacji napięcia wstępnego, wielkości tego napięcia i prędkości obrotowej łożyska na moment oporu ruchu łożyska,
- wykonania doświadczalnych badań współczynnika sztywności kontaktowej kulki łożyskowej i powierzchni płaskiej w celu weryfikacji modelu analitycznego,
- doświadczalnej weryfikacji modeli analitycznych momentu oporu ruchu łożyska,
- przeprowadzenia symulacyjnych i doświadczalnych badań rozkładu pola temperatury i określenie wpływu odkształceń cieplnych łożyska na opory jego ruchu,



## 2.2. Zakres pracy

Jak już wspomniano wyniki analizy literatury były podstawą do sformułowania celu i określenia zakresu pracy. I tak zgodnie ze sformułowaniem zakresem pracy w Rozdziale 4 przeprowadzono *modelowanie sił kontaktowych dla dwóch szybkoobrotowych łożysk wrzecionowych o oznaczeniach B7007-E-T-P4S i B7013-E-T-P4S*. Dla nich opracowano analityczny model dedukcyjny umożliwiający wyznaczenie promieniowego, sprężystego przemieszczenia ruchomego pierścienia, które jest uwzględniane w modelu rozszerzonym sił kontaktowych łożyska. Wykonano analityczne badania wpływu napięcia wstępnego i prędkości obrotowej na siły kontaktowe dla modelu rozszerzonego. Ponadto przedstawiono model dla sprężystego napięcia wstępnego, w którym składowa osiowa siły działającej na łożysko nie jest stała, co wynika z charakterystyki zastosowanego elementu sprężystego. W końcowej części *Rozdziału czwartego* przedstawiono wyniki badań sił kontaktowych w łożysku metodą elementów skończonych. Na podstawie wyników rozważań z *Rozdziału czwartego* przeprowadzono badania oporu ruchu łożyska w funkcji napięcia wstępnego i prędkości obrotowej. Wyniki tych badań przedstawiono w *Rozdziale piątym*. W *Rozdziale szóstym* przedstawiono wyniki badań doświadczalnych badań współczynnika sztywności kontaktowej pomiędzy kulką łożyskową a powierzchnią płaską. Badania miały na celu weryfikację teoretycznych modeli kontaktu ciał Hertza. Odształcenia występujące pomiędzy kulką a bieżnią łożyska są bardzo istotne z punktu widzenia tzw. równania geometrycznego, wykorzystywanego podczas modelowania sił kontaktowych.

W *Rozdziale siódmym* opisano przebieg i wyniki badań doświadczalnych oporu ruchu łożyska. Przeprowadzono pomiary momentu oporu ruchu łożysk ze smarem ze sprężystym i sztywnym napięciem wstępnym oraz bez smaru ze sprężystym napięciem wstępnym. *Rozdział ósmy* poświęcono modelowaniu rozkładu pola temperatury stanowiska badawczego. W pierwszej części rozdziału przedstawiono model sił kontaktowych, w którym uwzględnione są odształcenia cieplne. Model wykorzystano w dalszych badaniach do wyznaczenia mocy źródła ciepła w badaniach symulacyjnych wpływu napięcia wstępnego i prędkości obrotowej na temperaturę na stanowisku badawczym w stanie ustalonym. W *Rozdziale dziewiątym* opisano stanowisko do badań doświadczalnych, sposób realizacji badań doświadczalnych oraz uzyskane wyniki badań doświadczalnych rozkładu temperatury w stanie ustalonym. Wyniki badań doświadczalnych porównano z wynikami badań symulacyjnych. W ostatnim *Rozdziale dziesiątym* dokonano podsumowania pracy i określono kierunki dalszych badań.



### 3. OCENA PRACY

Metody wytwarzania rozwijane są niezwykle dynamicznie. Wynika to z rosnących wymagań w zakresie wydajności i dokładności obróbki oraz jakości warstwy wierzchniej i związane jest z kosztami produkcji i kosztami eksploatacji. A koszty te związane są między innymi z rodzajem stosowanych materiałów. W zasadzie konstruktor projektując wyrób decyduje o rodzaju materiału i metodach jego kształtowania oraz okresie eksploatacji a potem procesach utylizacji. Udział procesów skrawania w procesach produkcyjnych jest wciąż istotny; również w obróbce dokładnej z dużymi wydajnościami. Wciąż aktualnym trendem rozwojowym w zakresie obróbki skrawaniem jest ciągłe dążenie do wzrostu jej wydajności i dokładności. Zarówno wydajność jak i dokładność istotnie zależy od jakości obrabiarki. Z tego względu cel niniejszej pracy czyli opracowanie matematycznego modelu wielkości strat mocy w szybkoobrotowych kulkowych łożyskach skośnych stosowanych w elektrowrzecionach obrabiarek został poprawnie sformułowany i w pełni osiągnięty. Należy podkreślić, że Ilość wydzielającego się ciepła w elektrowrzecionach jest istotna z punktu widzenia odkształceń cieplnych, poprawności działania obrabiarki a tym samym błędów wykonania przedmiotów obrabianych został sformułowany poprawnie a prace związane z modelowaniem strat mocy w łożyskach są zasadne. Zatem uważam, że realizacja pracy w zakresie przedstawionym przez Autora była uzasadniona zarówno ze względów merytorycznych jak i praktycznych.

#### 3.1 Ocena wyboru tematu

Uwzględniając wyniki analizy literatury przedstawioną przez Aurora oraz moje własne doświadczenie uważam, że tematyka opiniowanej rozprawy dotyczy jeszcze nie zbadanych i nie rozwiązanych ostatecznie problemów teoretycznych i praktycznych procesów skrawania. Zatem jej wybór uważam za słuszny zarówno ze względów poznawczych jak i użytecznych. **Pragnę również podkreślić, że tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie „Inżynieria Mechaniczna” (Budowa i Eksploatacja Maszyn).**

#### 3.2. Ocena metodyki realizacji pracy.

Podstawowym etapem planowania i realizacji prac badawczych obejmujących modelowanie zjawisk występujących w procesach kształtowania wyrobów, projektowaniu urządzeń umożliwiających realizację procesów wytwarzania, projektowanie procesów produkcyjnych jest ocena poziomu rozwoju (stanu poznania) badanego procesu, poziomu rozwiązań konstrukcyjnych czy technologicznych czyli ocena stanu wiedzy w obszarze podejmowanych badań. Pragnę podkreślić, że Doktorant bardzo dobrze przeprowadził analizę stanu wiedzy w



zakresie podejmowanych badań podstawowych, technologicznych czy konstrukcyjnych. Ten fakt zagwarantował mu osiągnięcie sukcesu polegającego na tym, że w pracy zajmował się tylko badaniem jeszcze nie poznanych wystarczająco zjawisk towarzyszących procesom obróbki skrawaniem. Innymi słowy ogólną metodyką realizacji pracy oraz metodyką rozwiązywania zagadnień szczegółowych (np. opracowanie modelu dedukcyjnego) jest poprawna, co świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do realizacji prac badawczych.

### **3.3. Ocena merytoryczna**

Podstawowym celem opiniowanej rozprawy było między innymi:

opracowanie matematycznego modelu wielkości strat mocy w szybkoobrotowych kulkowych łożyskach skośnych stosowanych w elektrowrzecionach obrabiarek. Ilość wydzielającego się ciepła w elektrowrzecionach jest istotna z punktu widzenia poprawności działania obrabiarki i odkształceń cieplnych, a co za tym idzie błędów wykonania przedmiotów obrabianych

Autor w swoich rozważaniach wykazał, że zastosowana przez niego metodologia postępowania przy analizie danych literaturowych, modelowaniu matematycznym, badaniach doświadczalnych, opracowaniu i analizie uzyskanych wyników jest poprawna. Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta, które stanowią oryginalny wkład w rozwój procesów wytwarzania przyrostowego zaliczam:

- opracowanie analitycznych modeli sił kontaktowych w łożysku,
- przeprowadzenie badań wpływu sposobu realizacji napięcia wstępnego, wielkości tego napięcia i prędkości obrotowej łożyska na wartości sił kontaktowych,
- przeprowadzenie analitycznych badań wpływu sposobu realizacji napięcia wstępnego, wielkości tego napięcia i prędkości obrotowej łożyska na moment oporu ruchu łożyska,
- wykonanie doświadczalnych badań współczynnika sztywności kontaktowej kulki łożyskowej i powierzchni płaskiej w celu weryfikacji modelu analitycznego,
- doświadczalną weryfikację modeli analitycznych momentu oporu ruchu łożyska,
- przeprowadzenie symulacyjnych badań rozkładu temperatury i określenie wpływu odkształceń cieplnych łożyska na opory jego ruchu,
- doświadczalną weryfikację badań symulacyjnych rozkładu temperatury na stanowisku badawczym.



Uwzględniając powyższe uwagi stwierdzam, że praca została zrealizowana kompleksowo i na bardzo dobrym poziomie merytorycznym i zawiera wiele elementów nowości i oryginalności oraz informacji usprawniających projektowanie elektrowni

**Pragnę również podkreślić, że w realizacji pracy Autor wykazał się szeroką interdyscyplinarną wiedzą oraz umiejętnością wnikliwej i krytycznej oceny uzyskanych wyników.**

### **3.4. Ocena formalnej strony rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa, obejmuje 153 strony a w rozważaniach uwzględniono 114 pozycji literaturowych. Praca składa się z 10 rozdziałów oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Stosowane przez Autora definicje, nazwy i określenia są generalnie poprawne, a tytuł rozprawy odpowiada jej treści. Materiał ilustracyjny jest odpowiedni i charakteryzuje się bardzo dobrym poziomem edytorskim. Sporadycznie występują drobne potknięcia językowe i stylistyczne. Uwagi dotyczące strony formalnej pracy nie obniżają jej dużej wartości merytorycznej.

### **4. UWAGI**

Generalnie praca została zrealizowana poprawnie pod względem metodycznym i na bardzo dobrym poziomie merytorycznym i edytorskim. Zaprezentowane w pracy wyniki rozważań teoretycznych, metodyka badań, metodyka pomiarów metrologicznych, wyniki badań i ich opracowanie oraz ich analiza w pełni spełniają wymagania stawiane pracom doktorskim. Dlatego nie zgłaszam istotnych krytycznych uwag merytorycznych.

Natomiast sugeruję aby Doktorant uwzględnił w przyszłych pracach badawczych opracowanie modeli statystycznych funkcjonowania obrabiarki i jej zespołów (szczególnie elektrowni) oraz procesu skrawania. Uważam również, że w tych pracach przydatne mogłoby być uwzględnienie wyników badań z zakresu BIONIKI, która jest jednym z filarów koncepcji INDUSTRY 4.0.

### **5. OCENA KOŃCOWA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do bardzo ważnego i wciąż nie w pełni poznanego obszaru badawczego, związanego z obrabiarkami i procesami skrawania.

Doktorant opanował na wymaganym poziomie merytorycznym metodykę prowadzenia prac teoretycznych, prac doświadczalnych, metody planowania, realizacji i opracowania wyników badań, metody i technikę pomiarów wielkości fizycznych w aspekcie rozwiązywania złożonych

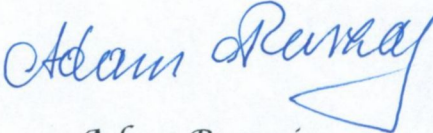


problemów inżynierskich. Uważam również, że Autor realizując pracę wykazał się niezbędną interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością analizy i krytycznej oceny uzyskanych wyników, co pozytywnie świadczy o Jego predyspozycjach i przygotowaniu do realizacji prac naukowo - badawczych. W związku z powyższym stwierdzam, że **rozprawa doktorska:**

**mgr inż. Mateusza Muszyńskiego**

**„Straty mocy w łożyskach tocznych obrabiarek *High Speed Cutting*”**

spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

  
Adam Ruszaj