

Dr hab. inż. Wojciech Sochacki, prof. PCz  
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn  
Politechnika Częstochowska

Częstochowa, 10.08.2023

## **Recenzja**

### **Rozprawy doktorskiej**

**Mgra inż. Piotra Reszki**

**pt. „Nośność łożysk tocznych wieńcowych z uwzględnieniem podatności połączeń śrubowych”**

wykonana na podstawie umowy z dnia 22 czerwca 2023 roku  
zawartej z Politechniką Częstochowską reprezentowaną przez  
Prorektora PCz **prof. dr hab. inż. Jerzego WYSŁOCKIEGO** oraz  
Dziekana WIMiI **prof. dr hab. inż. Małgorzatę KLIMEK**

## **Uwagi ogólne**

Obserwowany w ostatnich latach rozwój badań łożysk wieńcowych wynika w dużej mierze z rosnącego ich zastosowania w wielu obszarach techniki. Klasyczne ich zastosowanie ma miejsce w budownictwie, w przemyśle wydobywczym, w urządzeniach wojskowych, w przemyśle przetwórczym, w urządzeniach transportowych czy sprzęcie medycznym. W ostatnich latach zwiększa się zapotrzebowanie na łożyska wieńcowe z uwagi na szybki rozwój siłowni wiatrowych, w których łożyska wieńcowe są podstawowym węzłem obrotowym ze względu na możliwość przenoszenia dużych obciążeń przy stosunkowo zwartej konstrukcji.

Modelowanie i badania łożysk wieńcowych prowadzone są od końca lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Jednym z podstawowych efektów prowadzonych analiz numerycznych jest określenie charakterystyki nośności statycznej łożyska jako podstawowego kryterium służącego do jego doboru. Charakterystyki nośności katalogowej łożysk wieńcowych zamieszczane są w katalogach producentów. Sposoby obliczania nośności katalogowej mają różny poziom dokładności. W najprostszych sposobach obliczania nośności katalogowej przyjmuje się założenie o nieodkształcalności pierścieni łożyskowych. Tym

samym nie uwzględnia się również odkształcalności śrub mocujących łożysko. W obliczeniach uwzględnia się jedynie odkształcenia w strefie styku części tocznych z bieżniami. Taka metoda obliczania nośności łożysk, zwana niekiedy metodą „sztywnych pierścieni” jest prosta i szybka, nie wymaga skomplikowanego aparatu obliczeniowego, obarczona jest natomiast największym poziomem niedokładności oszacowania nośności. Pierwsze badania bazujące na nieodkształcalnych pierścieniach do dziś stanowią cenne wskazówki dla projektantów takich łożysk.

Rozwój nowoczesnych technik obliczeniowych, a w szczególności metody elementów skończonych pozwolił na uwzględnianie w modelach podatności pierścieni łożysk wieńcowych, jak i elementów struktur wsporczych w tym śrub mocujących. Specyficzne cechy łożyska wieńcowego, takie jak znaczny rozmiar średnicy czy znaczna liczba elementów tocznych i śrub w zespołach mocujących łożysko wymagają złożonych modeli obliczeniowych. Modele obliczeniowe takich łożysk ulegają dalszemu skomplikowaniu, jeżeli rozpatrywane są łożyska wieńcowe z dzielonymi pierścieniami. W tym przypadku nieodzownym staje się rozpatrywanie nośności zarówno zespołu części toczne – bieżnia łożyska, jak również nośności jako kryterium granicznej obciążalności zespołu śrub mocujących. Wykres nośności w takim przypadku może zawierać także charakterystykę zespołu śrub mocujących, która może ograniczać pole pracy łożyska warunkami granicznego obciążenia śrub.

Biorąc pod uwagę aktualność i potrzebę badań omówionych wcześniej zagadnień stwierdzam, że podjęta przez Doktoranta analiza nośności łożysk wieńcowych (wałeczkowych trzyczęściowych) z uwzględnieniem podatności połączeń śrubowych jest jak najbardziej trafna i wskazana ze względu na możliwość wykorzystania otrzymanych wyników w procesie doboru łożysk wieńcowych, jak również w czasie eksploatacji tego typu zespołów konstrukcyjnych.

### **Zakres pracy**

Praca składa się z ośmiu rozdziałów, wykazu literatury obejmującego 70 pozycji, z tego 3 pozycje współautorstwa Doktoranta, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu rysunków i tabel oraz spisu ważniejszych oznaczeń. Całość pracy przedstawionej do recenzji liczy 91 stron.

W krótkim wstępie Autor zdefiniował problematykę pracy oraz uzasadnił podjęcie tematyki obliczania połączeń śrubowych mocujących łożyska wieńcowe ze strukturami podparcia i nadwozia maszyn roboczych.

W rozdziale drugim przedstawiono podstawowe informacje na temat łożysk tocznych wieńcowych ze szczególnym zwróceniem uwagi na specyficzne cechy takich łożysk, ich zastosowanie i klasyfikację. Ponadto omówiono podstawowe problemy obliczeniowe takie jak: obliczanie nośności łożyska oraz nośności połączenia śrubowego, określanie trwałości i niezawodności łożysk wieńcowych oraz analizę zagadnień lokalnych dotyczących bezpośrednio stref styku części tocznych z bieżniami łożyska.

Rozdział trzeci stanowi szczegółowy przegląd literatury dotyczący obliczania śrub z napięciem wstępnym oraz obliczania śrub mocujących łożyska wieńcowe. W rozdziale tym Autor zwrócił uwagę na metody analityczne obliczania połączeń śrubowych stosowanych w łożyskach wieńcowych – metodę sztywnych pierścieni, która nie uwzględnia podatności struktur podparcia. W dalszej kolejności przybliżył wykorzystanie metod numerycznych w obliczaniu połączeń śrubowych, w których uwzględniono modelowanie i numeryczne obliczenia gwintu oraz modelowanie numeryczne połączeń śrubowych. Zagadnienia te są obszernie omówione z podkreśleniem sposobów modelowania samych śrub, jak i całości połączenia śrubowego mocującego łożysko wieńcowe.

W rozdziale czwartym Doktorant sformułował cel pracy oraz przedstawił szczegółowy zakres pracy obejmujący budowę numerycznych testowych modeli połączenia śrubowego, budowę numerycznego modelu łożyska wieńcowego wraz z elementami zabudowy łożyska, analizę rozkładu nacisków powierzchniowych na pierścieniach łożyska i zabudowy, badanie wpływu liczby śrub na parametry kontaktu łączonych powierzchni pomiędzy segmentami pierścieni i pierścieni z elementami zabudowy oraz badanie modelu łożyska w celu oszacowania poziomu wzajemnego wpływu zespołów śrub mocujących i części tocznych łożyska na ich nośność.

W kolejnym rozdziale omówiono zagadnienia modelowania połączenia śrubowego mocującego łożysko wieńcowe przy wykorzystaniu metod numerycznych oraz warunki techniczne zapewniające poprawny montaż śrub mocujących łożyska.

Rozdział szósty dotyczy modelowania i analizy wyników modeli testowych fragmentów połączenia mocującego łożyska oraz rzeczywistego modelu wybranego łożyska wraz z elementami jego podparcia w maszynie roboczej.

Wyniki obliczeń numerycznych Doktorant przedstawił w rozdziale siódmym pracy. Wyniki dotyczą analizy kontaktu na powierzchniach pierścieni przy różnym stopniu obciążenia dla trzech klas śrub mocujących łożysko oraz odległości pomiędzy śrubami wynoszącymi od 3 do 6 podziałek obciążenia. Siły wywierane przez wałeczki przyłożono z podziałką 25 mm. Ponadto przedstawiono wyniki symulacji uszkodzenia bądź poluzowania śrub mocujących.

Podsumowanie pracy i wnioski z niej wynikające Autor zamieścił w rozdziale ósmym.

### **Charakterystyka rozprawy**

Praca dotyczy zagadnień związanych z obliczaniem nośności statycznej łożysk wieńcowych trzyczęściowych wałeczkowych z dzielonymi pierścieniami. Poza obliczeniem nośności rzeczywistego łożyska wieńcowego 2000.3.20 montowanego w koparce JS 200 firmy JCB, Doktorant przeprowadził analizę obciążenia śrub mocujących łożysko do struktur podparcia.

Autor dysertacji nie formułuje tezy pracy, jednak na podstawie istniejącego stanu wiedzy oraz istniejących potrzeb sformułowany został podstawowy cel rozprawy. Zasadniczym celem rozprawy było przeprowadzenie badań dotyczących połączenia śrubowego łożyska wieńcowego z elementami jego zabudowy z wykorzystaniem numerycznych metod obliczeń metodą elementów skończonych. Do badań połączeń śrubowych wykorzystano dwa modele liniowe typu *rigid spider* z elementami belkowymi modelującymi trzpień śruby oraz model bryłowy. Modele te umożliwiły wprowadzenie napięcia wstępnego śrub w połączeniach z zaciskiem wstępnym. Przedmiotem badań było łożysko wieńcowe trzyczęściowe z uzębieniem wewnętrznym, w którym pierścień zewnętrzny łożyska jest dzielony.

Obok kryterium granicznej nośności zespołu części toczne – bieżnia łożyska oraz kryterium granicznej obciążalności zespołu śrub mocujących Doktorant zaproponował dodatkowe kryterium ciągłości kontaktu pomiędzy stykającymi się powierzchniami pierścienia dzielonego i pomiędzy powierzchniami pierścieni łożyska i zabudowy.

Realizacja tak postawionego celu wymagała wykonania następujących zadań szczegółowych:

Budowy numerycznych testowych modeli połączenia śrubowego.

Budowy numerycznego modelu łożyska wieńcowego z elementami zabudowy.

Badań ciągłości kontaktu pomiędzy pierścieniami łożyska i pierścieniem a zabudową łożyska.  
Badań modelu łożyska wieńcowego pod kątem wzajemnego wpływu zespołu śrub mocujących i części tocznych łożyska na ich nośność.

Zaproponowana przez Doktoranta metodyka modelowania łożysk tocznych wieńcowych wychodzi naprzeciw potrzebom praktycznym i pozwala na wiarygodną ocenę przyjętego obciążenia elementów tocznych i ocenę obciążenia zespołu śrub mocujących rzeczywistego obiektu.

Stwierdzam, że zrealizowany przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej zakres pracy, Jego wkład w rozwój metodyki obliczania łożysk tocznych wieńcowych z dzielonymi pierścieniami oraz uzyskane wyniki stanowią istotny wkład w rozwój budowy i eksploatacji maszyn mieszczącej się obecnie w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

### **Ocena redakcyjna rozprawy**

Praca zredagowana jest poprawnie, w sposób zrozumiały, z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. Układ tematyczny pracy jest logiczny. Podkreślenia wymaga staranne graficzne opracowanie rozprawy.

Mimo ogólnej pozytywnej oceny strony redakcyjnej pracy Autor nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć.

Nie dochowano staranności zapisu matematycznego stosując inną czcionkę w równaniach, a inną w opisie rysunków dla tych samych wielkości ( rys. 5.2. czy rys. 5.9.).

Przeniesiono tabelę 4 na następną stronę, chociaż wielkość tabeli pozwala na umieszczenie jej na jednej stronie.

Nie dochowano staranności korekty tekstu co doprowadziło do wielu nieprecyzyjnych określeń i niezrozumiałych zdań jak np.:

- „...zweryfikować tę metodykę obliczania połączeń być na drodze badań eksperymentalnych....” Str.22,
- „...budowę numerycznych testowych modelu połączenia...” str.40,
- „...wystarczy nałożyć niewielkie (10% ostatecznego) obciążenia wstępnego na dokręcone śruby....” Str.46,
- „...utratę kontaktu pomiędzy powierzchniami pierścieni....” Str.59,
- „...kontakt między powierzchniami pierścieniami łożyska a zabudową....” Str.61,
- „...Wykresy rozkładów naprężeń złącza śrubowego w dwóch liniach...” str. 65

- „...w punktach pracy łożyska zlokalizowanych przy wartościach bliskich zeru...” str. 72,
  - „...zagadnień kontaktowych w strefie styku nośności...” str. 76,
  - „...pierścieni łożyska jak i tak powierzchni łożyska...” Str.85,
  - „...całkowity zanik kontaktu pomiędzy w licznych analizowanych przypadkach....” Str. 85,
- Popołniono wiele drobnych błędów drukarskich (zamiana liter czy brak polskich liter) oraz interpunkcyjnych. Zauważone usterki zaznaczono w tekście recenzowanej pracy i przekazano Autorowi.

### **Uwagi do pracy**

W tytule rozprawy Doktorant sygnalizuje obliczanie nośności łożysk tocznych wieńcowych z uwzględnieniem podatności połączeń śrubowych. Wspomniana podatność śrub jest w pracy uwzględniana jako takie ich obciążenie, w wyniku którego może powstać nieszczelność połączenia. Co zatem stało na przeszkodzie, aby otrzymane wyniki obciążalności śrub do utraty kontaktu przez pierścienie łożyska nanieść na charakterystykę nośności statycznej badanego łożyska?

Czy poprawnie zinterpretowany jest parametr *Nodal Normal Traction* jako zredukowane naprężenia kontaktowe na rysunkach 7.1, 7.2 i wielu kolejnych?

Czy fizycznie możliwa jest całkowita utrata kontaktu pomiędzy pierścieniami bez wcześniejszej częściowej utraty kontaktu, co sugerowane jest w tabeli 5 (Model 4, odcinek Aw, klasa śrub 8.8 czy odcinek Bw dla wszystkich klas śrub)?

Analiza przeprowadzona w podrozdziale 7.2 dotycząca wpływu napięcia wstępnego w śrubach mocujących łożysko do zabudowy na możliwość luzowania śrub, a finalnie również na nośność układu łożysko – zabudowa nie znalazła swojego odniesienia we wnioskach pracy.

Chciałbym podkreślić, że wymienione uwagi nie umniejszają w sposób istotny wartości merytorycznej rozprawy i w dużej mierze mają charakter dyskusyjny.

### **Wnioski końcowe**

Praca jest poprawna pod względem merytorycznym. Doktorant wykazał się umiejętnością oryginalnego i samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych. Autor rozprawy wykazał się także dobrą znajomością budowy modeli do symulacji numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Doktorant poprawnie rozwiązał

postawiony w pracy problem badawczy, tym samym cele naukowe rozprawy zostały osiągnięte. Należy zatem stwierdzić, że Pan mgr inż. Piotr Reszka wykazał dobre przygotowanie do samodzielnej pracy naukowej.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana praca jest oryginalna i przedstawia nowe osiągnięcia badawcze o istotnych walorach poznawczych, a zatem spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zawarte w *Ustawie z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki*.

**Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie mgra inż. Piotra Reszki do publicznej obrony.**