

Poznań, 22.08.2023r.

dr hab. inż. Krzysztof Talaśka, prof. PP
Instytut Konstrukcji Maszyn
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Poznańska

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Reszki
pt.: „Nośność łożysk tocznych wieńcowych z uwzględnieniem podatności połączeń
śrubowych”

Promotor: dr hab. inż. Marcin Kubiak, prof. PCz

1. Podstawa prawna

Podstawą wykonania recenzji była Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej nr 32/2022/2023 z dnia 6 czerwca br. przekazana pismem z dnia 27 czerwca br. dra hab. inż. Janusza Szmidli, prof. PCz, Kierownika Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska liczy 8 rozdziałów, zawiera również wykaz ważniejszych oznaczeń, streszczenie w języku polskim oraz angielskim, spis literatury oraz spis rysunków i tabel. Całość została przedstawiona na 91 stronach.

Rozdział 1 to wstęp, w którym zawarto krótkie wprowadzenie w tematykę z charakterystyką zastosowania łożysk tocznych wieńcowych oraz istotę ich zabudowy z wykorzystaniem połączeń śrubowych. Autor zwraca uwagę, że metodyka postępowania podczas projektowania węzłów konstrukcyjnych z wykorzystaniem łożysk tocznych wieńcowych jest istotna szczególnie ze względu na konieczność odmiennego podejścia niż w przypadku łożysk tocznych ogólnego przeznaczenia.

Rozdział 2 zawiera podstawowe informacje o łożyskach tocznych wieńcowych. Autor zwraca szczególną uwagę na fakt, że łożyska tego typu mogą być obciążane momentem normalnym

do płaszczyzny przechodzącej przez oś łożyska oprócz standardowego obciążenia wzdłużnego (osiowego) oraz promieniowego. Ponadto łożyska te mają inne niż w przypadku łożysk standardowych proporcje średnicy pierścieni do wymiarów charakterystycznych elementów tocznych, których w tego typu łożyskach może być zdecydowanie więcej niż w łożyskach tzw. standardowych. Istotna jest również odmienność mocowania (zabudowy) tego typu łożysk z wykorzystaniem połączeń śrubowych tworzących złącza kołnierzowe. Ze względu na gabaryty, nie są one wykonywane ze stali łożyskowych, a elementy toczne są obciążane w sposób ekstremalny dochodząc do wartości napreżeń zbliżonych do granicy plastyczności materiału. Ze względu na specyficzne zastosowanie (węzeł obrotu maszyny roboczej) jeden z pierścieni łożyska może być uzębiony. Łożyska te charakteryzują się niewielką prędkością obrotową, co pozwala je nazwać wolnoobrotowymi (prędkość obrotowa zazwyczaj poniżej 10 obr/min.). Powyższe cechy zdecydowanie wymagają odrębnych sposobów obliczania parametrów łożyska oraz innych metod projektowania. Autor przedstawia wiele przykładów zastosowania łożysk tocznych wieńcowych oraz ich klasyfikację. W dalszej części rozprawy autor skupia się na podstawowych problemach obliczeniowych łożysk wieńcowych, opisuje sposób określania nośności tego typu łożysk oraz nośności połączenia śrubowego zwracając uwagę, że może być ona określona z różnym poziomem uproszczenia. W **rozdziale 3** autor zawarł przegląd literatury dotyczącej obliczania śrub z napięciem wstępnym oraz obliczania połączeń śrubowych mocujących łożyska wieńcowe. Na początku zostało przedstawione analityczne podejście do obliczeń połączeń śrubowych ze szczególnym zwróceniem uwagi na założenia upraszczające (nie uwzględnianie podatności struktur podparcia oraz wpływu mocowania na nośność łożysk wieńcowych). W dalszej części rozdziału autor skupia się na wykorzystaniu metod numerycznych w obliczaniu połączeń śrubowych, zwraca uwagę na różne podejścia do modelowania śrub, gwintu, określania interakcji powierzchni kontaktowych, wpływu uwzględnienia rzeczywistych powierzchni łba śruby, nakrętki, traktowania zadania obliczeniowego jako dwu lub trójwymiarowe. Następnie autor skupia się na bardziej specyficznym rodzaju połączenia śrubowego kołnierzowego oraz sposobach podejścia do modelowania numerycznego takiego typu połączeń. W dalszej części autor przechodzi do opisu, przykładów analizy numerycznej mocowania pierścieni łożyska wieńcowego śrubami, które można znaleźć w literaturze. Szczególną uwagę zwraca na modelowanie śruby w postaci „*quasi-rzeczywistej*”, jako zastępczy element belkowy z napięciem wstępnym i łbem oraz jako element belkowy z napięciem wstępnym. Podsumowując rozdział Autor stwierdza, że „*symulacje połączeń można przeprowadzić z uproszczoną reprezentacją śruby jako ciała liniowe*”.

Rozdział 4 zawiera cel i zakres pracy. Głównym celem pracy jest badanie połączenia śrubowego łożyska wieńcowego z elementami jego zabudowy z wykorzystaniem numerycznych metod obliczeń metodą elementów skończonych. Badania dotyczą wpływu

mocowania łożyska na rozkład obciążenia części tocznych w zespole *bieżnia-części toczne* oraz na rozkład zredukowanych naprężeń kontaktowych na powierzchniach pierścieni łożyska i zabudowy z uwzględnieniem kryterium szczelności tego połączenia. Zamysłem autora jest przybliżenie wytycznych do konstruowania połączeń śrubowych różnego typu.

Zakres pracy obejmuje:

- 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 łożyska i pierścieni z elementami zabudowy,
- badanie modelu łożyska wieńcowego w celu oszacowania poziomu wzajemnego wpływu zespołów śrub mocujących i części tocznych łożyska na ich nośność.

W **rozdziale 5** Autor zawarł informacje na temat modelowania połączenia śrubowego mocującego łożysko wieńcowe. W szczególności przedstawił ujęcie klasyczne obliczania takiego typu połączenia oraz wykorzystanie metod numerycznych do symulacji połączeń śrubowych. W rozdziale tym zostały również przedstawione techniczne warunki zapewniające poprawny montaż śrub mocujących łożyska wieńcowe.

Rozdział 6 zawiera numeryczne modele śrub i łożyska. Autor deklaruje, że wszystkie prezentowane wyniki naprężeń zredukowanych w pracy to naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego. Ważnym aspektem, który był brany pod uwagę jest kryterium szczelności złącza, które wg. autora nie było brane pod uwagę podczas analizy analogicznych przypadków połączeń przedstawionych w omawianej literaturze. Dodatkowym celem prowadzonych analiz numerycznych było określenie wpływu podziałki rozstawu śrub na obwodzie łożyska wieńcowego na jakość złącza, która była rozumiana jako zapewnienie kontaktu pomiędzy łączonymi częściami na całej długości przęseł pierścieni łożyska. Za przęsło przyjmowano odcinek pierścienia łożyska pomiędzy sąsiadującymi śrubami. Autor do analiz używał systemu ADINA. Wykonał model z łożyskiem wałeczkowym trzyczęściowym o średnicy 2 m. Łożysko mocowano śrubami M24 o trzech różnych klasach wytrzymałości: 8.8, 10.9 oraz 12.9. Śruby modelowano na kilka sposobów (różne stopnie uproszczenia):

- model śruby L1, który wykorzystywał liniowy element belkowy do modelowania trzpienia śruby oraz zestaw elementów sztywnych do modelowania łbów i nakrętek śruby,
- model śruby L2 wykorzystuje te same elementy belkowe liniowe i sztywne z tą różnicą, że elementy sztywne reprezentujące łb śruby oraz nakrętkę są ułożone pod kątem 45° względem osi śruby, zabieg taki powoduje zwiększenie długości trzpienia śruby,
- model śruby B, który był pełnym modelem bryłowym śruby z uwzględnieniem powierzchni kontaktowych pod łbem śruby i nakrętki, model nie uwzględniał powierzchni gwintowej.

Śruby w zależności od klasy wytrzymałości obciążano napięciem wstępnym o wartościach 168 kN, 239 kN oraz 280 kN. Siły wywierane przez elementy toczne (35,7 kN) przykładano z podziałką 25 mm. Modele śrub sprawdzano na modelu z prostoliniowymi wycinkami pierścieni łożyska (uproszenie przyjęte na podstawie dużego promienia łożyska). Kolejny model (testowy II) zawierał wycinek łożyska z krzywizną pierścienia w celu porównania z modelem prostoliniowym oraz do analizy uszkodzenia śrub w połączeniu. Kolejny model III (globalny) zawierał symetryczny model ramy podwozia koparki JS 200 firmy JCB wraz z łożyskiem wieńcowym 2000.3.20.

Rozdział 7 zawiera wyniki obliczeń numerycznych. W rozdziale tym przedstawiono na odpowiednich grafikach rozkład naprężeń zredukowanych dla przypadków gdy elementy toczne nie były obciążone oraz dla przypadku, w którym elementy były obciążone. Autor przyjął metodologię związaną z identyfikacją jakości połączenia poprzez analizę naprężeń kontaktowych na podstawie weryfikacji ich wartości wzdłuż powierzchni kontaktowych pomiędzy śrubami mocującymi. Autor dochodzi do wniosku, że efektywnym jest model z trzema podziałkami elementów tocznych, ponieważ w tym przypadku nie występuje całkowita utrata naprężenia kontaktowego. Analiza wyników otrzymanych obliczeń związanych z modelem globalnym prowadzi do określonych różnic w jakości połączenia w zależności od klasy wytrzymałości śrub, oraz do wyznaczenia określonej wartości napięcia wstępnego, zapewniającego odpowiednie połączenie w trakcie zmiennych obciążeń łożyska przy założeniu rzeczywistej struktury konstrukcyjnej korpusu maszyny. Wykorzystanie modelu testowego (model lokalny II) pozwala określić warunki współpracy poszczególnych powierzchni połączenia w przypadku uszkodzenia wybranej śruby. Analiza wyników uzyskanych podczas obliczeń związanych z tym modelem umożliwia oszacowanie skuteczności połączenia śrubowego z brakiem wybranych śrub.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie i wnioski. Autor dysertacji sformułował cztery główne wnioski. Pierwszym z nich było potwierdzenie wzajemnego związku pomiędzy obciążalnością zespołu śrub mocujących a nośnością zasadniczego zespołu łożyska wieńcowego. Autor podkreśla zasadnicze różnice w wynikach uzyskiwanych podczas analizy rozpatrywanego zadania z wykorzystaniem metody sztywnych pierścieni oraz z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Autor potwierdził w swoich analizach, że podczas pracy węzła konstrukcyjnego z wykorzystaniem analizowanego łożyska wieńcowego może dochodzić do całkowitej utraty kontaktu pomiędzy pierścieniami łożyska a zabudową. Według Autora zalecane jest stosowanie kryterium szczelności (zapewnienie kontaktu pomiędzy powierzchniami) oraz przeprowadzenie analizy obliczeniowej łożyska wraz z zabudową, ze szczególnym uwzględnieniem tych wytycznych podczas analizy węzłów konstrukcyjnych z łożyskiem z dzielonymi pierścieniami z uzębieniem wewnętrznym (pierścień zewnętrzny jest dzielony). Ostatni wniosek główny Autora dotyczy konieczności przeprowadzenia analizy

numerycznej łożyska wraz z zabudową, szczególnie gdy planowane jest wykorzystanie łożyska z obciążeniami zbliżonymi do dopuszczalnych (współczynnik bezpieczeństwa jest niewielki).

Literatura zawiera 70 pozycji z czego 6 to normy oraz katalogi firmowe

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca stanowi spójne opracowanie dotyczące problematyki obliczeń projektowych węzłów konstrukcyjnych zabudowy łożysk wieńcowych z wykorzystaniem połączeń śrubowych. Tematyka ta, choć od wielu lat rozwijana przez wielu badaczy z Polski i zagranicy nadal stanowi aktualne źródło rozważań zmierzających do udoskonalenia metodyki projektowania tego typu zespołów maszynowych. Głównie ze względu na gabaryty łożyska, a także przez wiele powtarzających się elementów wchodzących w skład zabudowy: elementy toczne oraz elementy złączy śrubowych, obliczenia projektowe wymagają szeregu założeń upraszczających. Autor dysertacji w części teoretycznej obszernie przedstawił różne podejścia w tym zakresie, od najprostszych i zawierających najdalej idące uproszczenia (obliczenia analityczne) po bardziej zaawansowane i mogące uwzględnić wiele warunków rzeczywistych wynikających z eksploatacji tego typu węzłów konstrukcyjnych. Autor rozprawy realizował prace naukowe w zespole badawczym zajmującym się tą tematyką od wielu lat. To pozwoliło mu sprecyzować ograniczenia dotychczas wykorzystywanych metod obliczeniowych i zaproponować własne podejście w tym zakresie, bardziej precyzyjne uwzględniające również rzeczywistą strukturę konstrukcyjną elementów podwozia koparki oraz podatność tych elementów. Autor dysertacji sformułował cel pracy: *...przybliżenie wytycznych do konstruowania połączeń śrubowych różnego typu, określenie liczby śrub w łożysku oraz doboru łożyska na podstawie kryterium szczelności łącza (kontakt pomiędzy łączonymi częściami łożyska i zabudowy)*. Sformułował również kilkupunktowy zakres pracy. Na podstawie otrzymanych wyników badań był w stanie sformułować wnioski, które obejmowały:

- potwierdzenie wzajemnego związku pomiędzy obciążalnością zespołu śrub mocujących a nośnością zasadniczego zespołu łożyska wieńcowego,
- potwierdzenie, że podczas pracy węzła konstrukcyjnego wykorzystującego analizowane łożysko wieńcowe może dochodzić do całkowitej utraty kontaktu pomiędzy pierścieniami łożyska a zabudową,
- zalecenie stosowania kryterium szczelności (zapewnienie kontaktu pomiędzy powierzchniami) oraz przeprowadzenie analizy obliczeniowej łożyska wraz z zabudową, ze szczególnym uwzględnieniem tych wytycznych podczas analizy węzłów konstrukcyjnych z łożyskiem z dzielonymi pierścieniami z uzębieniem wewnętrznym (pierścień zewnętrzny jest dzielony),

- konieczność przeprowadzenia analizy numerycznej łożyska wraz z zabudową, szczególnie gdy planowane jest wykorzystanie łożyska z obciążeniami zbliżonymi do dopuszczalnych (współczynnik bezpieczeństwa jest niewielki).

Przedstawiona do recenzji praca doktorska jest potwierdzeniem, że autor prezentuje wymaganą ogólną wiedzę teoretyczną oraz dowodzi umiejętności prowadzenia pracy naukowej.

4. Uwagi, komentarze oraz pytania

Analizę przedstawionego do recenzji tekstu utrudniają pewne nieścisłości, skróty myślowe, kolokwializmy, których uniknięcie lub eliminacja podniosłoby walory poznawcze tematyki badawczej i wyników badań zawartych w dysertacji. Poniżej wybrane uwagi szczegółowe:

1. Czy fotografie na rys. 2.2-2.5 są autorstwa Doktoranta?
2. Str. 30, „Modelowanie i obliczenia wykonano za pomocą programu ADINA [51]. Str. 31, „Model zbudowano korzystając z programu ADINA [65]. Czy oba źródła dotyczą tego programu?
3. Str. 36: „Krynke w swojej pracy doktorskiej [47]” Czy to dobre źródło literaturowe?
4. W rozdziale 4 „*Cel i zakres pracy*” autor pisze: *”Badanie dotyczy wpływu mocowania łożyska na rozkład obciążenia części tocznych w zespole bieźnia – części toczne...”*. Zdanie to jest niejednoznaczne, sugeruje, że w pracy znajdują się badania rozkładu obciążenia części tocznych. Zdaniem recenzenta Autor nic takiego nie analizował.
5. W tym samym rozdziale autor pisze: *”Praca ma przybliżyć wytyczne do konstruowania połączeń śrubowych różnego typu...”*. Co Autor rozumie przez połączenia śrubowe różnego typu?
6. W tym samym rozdziale autor pisze: *”...określenie liczby śrub w łożysku...”* Co Autor przez to rozumie?
7. Na czym polega *”...dobór łożyska na podstawie kryterium szczelności łącza...”*? – str. 40,
8. Str. 42: *”...pomiędzy napięciem wstępnym Q_z a zaciskiem resztkowym Q_w ..”* Błędne oznaczenia.
9. Co autor rozumie przez *”...skrócenie tzw. długości bazowej poprzez rozciągnięcie śruby...”*? – str. 44,
10. Co autor rozumie poprzez *”...skrócenie długości modelu...”* – str. 44,
11. W pracy pojawiają się odwołania do programów, np.: LWd_07, nlkw07. W dysertacji powinno się znaleźć miejsce na bliższe zdefiniowanie założeń, możliwości, zakresu wykorzystania itp.

12. Podczas definiowania modelu testowego I Autor wskazał, że wykorzystywał współczynnik tarcia o wartości 0,15, w modelu globalnym wykorzystywany współczynnik tarcia wynosił 0,16. Skąd te wartości, skąd różnica? Jaki model tarcia został wykorzystany?
13. Dlaczego w różnych modelach wykorzystywano różne wartości sił obciążających elementy toczne? Raz było to 35,7 kN, innym razem 33,748 kN.
14. Str. 61: „Wałeczki zamodelowano elementami prętowymi o charakterystyce nieliniowej (bez luzu) o długości 20 mm. Charakterystyki tych elementów wyznacza się w odrębnej procedurze według [107].” Co to za procedura? Co to za źródło? Dysertacja ma 70 pozycji literaturowych, skąd pozycja 107?
15. Str. 61: „...powierzchnie kontaktu modelu łożyska i modelu ramy koparki nie są jednorodne.” Co autor przez to rozumie?
16. W modelu testowym I śruby zamodelowano na kilka sposobów (różne stopnie uproszczenia):
- model śruby L1, który wykorzystywał liniowy element belkowy do modelowania trzpienia śruby oraz zestaw elementów sztywnych do modelowania łbów i nakrętek śruby,
 - model śruby L2 wykorzystuje te same elementy belkowe liniowe i sztywne z tą różnicą, że elementy sztywne reprezentujące łeb śruby oraz nakrętkę są ułożone pod kątem 45° względem osi śruby, zabieg taki powoduje zwiększenie długości trzpienia śruby,
 - model śruby B, który był pełnym modelem bryłowym śruby z uwzględnieniem powierzchni kontaktowych pod łbem śruby i nakrętki, model nie uwzględniał powierzchni gwintowej.

Zdaniem recenzenta model testowy I ze śrubą L1 i L2 mógłby zostać całkowicie pominięty, szczególnie, że sam Autor stwierdza, że *„...przy zastosowaniu modelu pełnej śruby (model B), rozkład naprężeń kontaktowych jest zupełnie inny, na powierzchni kontaktu następuje utrata kontaktu na znacznie większym obszarze, w tym między śrubami. Dzieje się to z tego powodu, iż pełne modele śrub odwzorowują lepiej wyniki w zakresie kontaktu stykających się powierzchni niż śruby z elementem belkowym i połączeniem rigid spider, co stwierdzono m.in. w innych badaniach wspomnianych w literaturze. Element beam z rigid spider daje sztywny układ modelu dyskretnego śruby. W przypadku działania obciążenia zewnętrznego na układ analizowanego połączenia śrubowego przy zastosowaniu modeli pełnych śrub powierzchnia szybciej traci kontakt, wynika to z zachowania warunków wytrzymałości tych śrub, które mogą uwzględniać zginanie śruby.”* Czas przeznaczony na te analizy

oraz miejsce w rozprawie można by dzięki temu wykorzystać na kolejne dokładniejsze modele uwzględniające korpus maszyny oraz inne typy łożysk.

17. Str. 67: „...można zauważyć, że optymalnym modelem jest model z trzema podziałkami elementów tocznych...”. W którym miejscu dysertacji Autor dokonywał optymalizacji?
18. Rysunki 7.8-7.11 oraz obszerne ilości treści pochodzą z artykułu [38]. Współautorski artykuł Autora. Dlaczego w żadnym miejscu nie jest to zaznaczone?
19. Niektóre źródła literatury mimo, że znajdują się w spisie nie są zaznaczone w tekście dysertacji, np.: 31, 38, 41, 46.
20. Co autor rozumie przez postać „quasi-rzeczywistą” śruby?
21. Ze względu na fakt, że jeden z pierścieni tego typu łożysk może być uzębiony (końcowy element przekładni zębatej mechanizmu obrotu) czy wnioski jakie otrzymał Doktorant z przeprowadzonych analiz mogą nakierować na coś więcej na temat mechanizmu zazębienia biorąc pod uwagę ten węzeł konstrukcyjny?

Przedstawione powyżej uwagi, pytania i komentarze mają na celu zwrócenie uwagi na pewne braki redakcyjne oraz niejednoznaczności i nieściśłości w tekście rozprawy. Nie ujmują jednak one, zdaniem recenzenta, ogólnego pozytywnego odbioru rozprawy zarówno pod względem naukowym jak i redakcyjnym.

5. Wnioski końcowe

Uważam, że tematyka poruszana w recenzowanej rozprawie doktorskiej wchodzi w zakres dyscypliny naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn (obecnie Inżynieria Mechaniczna). Biorąc pod uwagę wartość naukową rozprawy, zakres przeprowadzonych prac oraz to, że Doktorant wykazał się umiejętnością oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14.03.2003 z późn. zm. Podsumowując, wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej o dopuszczenia mgra inż. Piotra Reszki do dalszego postępowania kwalifikacyjnego przewidzianego w procedurze do uzyskania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna (wcześniej Budowa i Eksploatacja Maszyn).

Krzysztof Talas