

Wrocław, 22.11.2021r.

Prof. dr hab. inż. Waclaw Skoczyński
Politechnika Wroclawska
Wydział Mechaniczny
Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Pochopnia

pt. „*Badania odkształceń statycznych wybranych węzłów konstrukcyjnych obrabiarek do obróbki zestawów kolejowych*”

opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej z dnia 20.10.2021r.

1. Ocena aktualności podjętego problemu naukowego

Stale rosnące wymagania dotyczące dokładności i wydajności obróbki stawiają konstruktorom zadania optymalnego projektowania elementów składowych obrabiarek. Jest to zadanie bardzo złożone, bo wymaga nie tylko obszernej wiedzy na temat związków między własnościami obrabiarki a konstrukcyjnym ukształtowaniem jej elementów składowych, lecz również dysponowania sposobami oceny konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych. Dokładność obróbki zależy od szeregu różnych czynników, do których można zaliczyć odkształcalność statyczną układu OUPN pod wpływem obciążeń roboczych, sił zacisku i sił ciężkości, drgania oraz błędy geometryczne i kinematyczne obrabiarki, rozszerzalność cieplną przedmiotu obrabianego i zespołów konstrukcyjnych obrabiarki.

Autor rozprawy wybrał jeden z tych czynników – sztywność statyczną - jako wskaźnik przeprowadzonego procesu optymalizacji. Uważam to za słuszne, bo chociaż badania własności statycznych nie są znormalizowane, to w odniesieniu do odkształcalności statycznej istnieje obecnie wiele możliwości przeprowadzenia zarówno badań doświadczalnych, jak i analiz numerycznych, co stwarza większe prawdopodobieństwo osiągnięcia sukcesu w zakresie optymalizacji konstrukcji. Warto jednak wspomnieć, że metody eksperymentalne stawiają pewne ograniczenia związane z metodą pomiaru i sposobem obciążenia obrabiarki. Trudne jest też czasem odniesienie wyników badań do konkretnych elementów konstrukcyjnych, których parametry miałyby być zmodyfikowane. Z kolei w przypadku

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia3.0.11.2021..... 1

nr 29/rdme/006/.....
zał.

2021/2022

metod obliczeniowych zawsze występują błędy modelowania związane z dyskretyzacją struktury, przyjmowaniem parametrów sprężysto – tłumiących połączeń i nieuwzględnieniem czynników związanych z dokładnością wykonania elementów składowych obrabiarki i ich montażu.

W przypadku obrabiarek podstawą do oceny ich własności statycznych są względne przemieszczenia między przedmiotem i narzędziem zachodzące pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych lub zastępczych. Cechą charakterystyczną obrabiarek jest to, że w warunkach eksploatacyjnych zmienia się ich struktura, położenie punktu zaczepienia wypadkowej siły skrawania, jej wartość i kierunek działania oraz wartość i kierunek sił od napędu. Wymaga to podjęcia podczas badań decyzji co do przyjęcia reprezentatywnych położenia zespołów obrabiarki i reprezentatywnych warunków obciążenia. Przyjęty stan obciążenia układu (lub zbiór takich stanów) powinien dobrze modelować obciążenie, któremu podlegać będzie badany układ konstrukcyjny w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

Tematyka rozprawy doktorskiej była przedmiotem szeregu opublikowanych prac badawczych prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych. Jest jednak wciąż aktualna, bo występuje stałe zapotrzebowanie przemysłu na modyfikacje konstrukcji obrabiarek z uwagi na ograniczanie kosztów ich produkcji i polepszenie walorów eksploatacyjnych. Rozprawa przedstawia odpowiedni poziom naukowy i posiada walory oryginalności w odniesieniu do zaproponowanej metodyki badań i analiz numerycznych, zwłaszcza że została zrealizowana na unikalnych konstrukcjach obrabiarek specjalnych. Uznanie budzi zarówno zestawienie nowoczesnego stanowiska badawczego oraz sposób przeprowadzenia badań, jak i biegłość wykorzystania metod numerycznych. Zakres rozprawy jest adekwatny dla sformułowanego przez Doktoranta celu naukowego.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Praca liczy 140 stron tekstu i zawiera 10 rozdziałów, wykaz literatury, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz 4 załączniki umieszczone na załączonej płycie CD. Struktura układu treści rozprawy doktorskiej jest logiczna i przejrzysta, zgodna z przyjętymi formami tego typu prac. Część ilustracyjna rozprawy jest bardzo bogata i zawiera 118 rysunków i 20 tabel. Bibliografia obejmuje 99 pozycji, w tym 6 stron internetowych, 10 norm, 16 katalogów i dokumentacji technicznej oraz 5 instrukcji. Cytowana bibliografia jest aktualna, bo 46 pozycje literaturowe zostały opublikowane w ostatnim dziesięcioleciu, a 39 pozycji pochodzi z poprzedniego dziesięciolecia, co daje łącznie 85% źródeł

bibliograficznych. Dzięki starannym i przejrzystym ilustracjom, obejmującym wiele szczegółów, pracę dobrze się czyta i łatwiej można analizować wyniki.

Autor po bardzo krótkim wstępie przeprowadził analizę literaturową, w której uwzględnił ogólne informacje na temat remontów i utrzymania taboru kolejowego oraz scharakteryzował obróbkę zestawów kołowych podając wymaganą geometrię bieżni koła kolejowego i tarcz hamulcowych oraz dane dotyczące procesu technologicznego ich obróbki. W dalszej wstępnej części pracy skupił się na rozważaniach dotyczących sztywności statycznej obrabiarek, a w szczególności jej badań. Do wyciągnięcia praktycznych korzyści z planowanych badań sztywności obrabiarek zaproponował wykorzystanie metodyki optymalizacji topologicznej dostępnej w module *Simulation Professional* oprogramowania *SolidWorks*.

W kolejnym rozdziale Doktorant sformułował cel pracy, którym była weryfikacja dwóch tokarek do obróbki zestawów kolejowych w kontekście oceny sztywności statycznej wybranych podzespołów. Postawił również tezę, że *w analizowanych tokarkach możliwe są do wprowadzenia zmiany dotyczące tylko wybranych węzłów konstrukcyjnych, których następstwem będzie polepszenie własności sztywnościowych lub zmniejszenie ciężaru węzłów o zadowalającej sztywności*. Autor zaproponował rozwiązanie problemu naukowego na drodze badań doświadczalnych dwóch typów tokarek specjalnych i analiz numerycznych modeli tych obrabiarek.

W dalszej części pracy Doktorant scharakteryzował układy konstrukcyjne i podstawowe parametry analizowanych tokarek do obróbki zestawów kołowych: podtorowej i portalowej. W kolejnym rozdziale opisał stanowisko badawcze oraz przedstawił program i wyniki badań doświadczalnych sztywności statycznej obu maszyn. Następnie zamodelował elementami skończonymi podstawowe zespoły konstrukcyjne tych obrabiarek i przeprowadził analizy numeryczne wyznaczając wskaźniki sztywności. W kolejnym rozdziale Autor ocenił wpływ sztywności obrabiarki na dokładność obróbki zestawów kołowych, a podsumowanie pracy stanowi przeprowadzenie optymalizacji wybranych węzłów obu obrabiarek: płyty suportu, suwaka suportu i suwaka do tarcz hamulcowych. Na końcu pracy Doktorant sformułował wnioski, a efektem użytecznym rozprawy było opracowanie pełnej dokumentacji wdrożeniowej zmian konstrukcyjnych badanych zespołów obu tokarek

3. Uwagi ogólne

Doktorant podjął się rozwiązania bardzo ambitnego zadania w postaci poprawy rozwiązań konstrukcyjnych dwóch obrabiarek specjalnych z wykorzystaniem badań eksperymentalnych i analiz numerycznych. Jako główny wskaźnik własności tych maszyn przyjął sztywność statyczną.

Do badania sztywności statycznej obrabiarek autor poprawnie skonfigurował stanowisko, które umożliwiałoby wywieranie obciążenia statycznego między przedmiotem obrabianym a narzędziem oraz pomiar przemieszczeń. Siłownik był mocowany na elemencie zestawu kołowego (kole lub hamulcu) lub maźnicach zewnętrznych, których przemieszczeń nie mierzono, bo autor założył, że ich odkształcenia podczas badań będą pomijalnie małe. Czy przemawiały za tym jakieś przesłanki lub pomiary? Czy sposób podparcia czujnika przemieszczeń na elementach zestawu kołowego mógł mieć wpływ na wyniki pomiarów?

Autor zrealizował bardzo szeroki program badań sztywności statycznej. W przypadku obu obrabiarek przeprowadził je w wielu położeniach suportów i suwaków dla dwóch niezależnych zespołów suportowych, rejestrując przemieszczenia noża w kierunku działania składowych siły skrawania. Tego typu obciążenia i miejsca pomiaru siły i przemieszczeń są typowym podejściem w przypadku badania własności statycznych obrabiarek, chociaż nie umożliwiają realizacji badań z wykorzystaniem zastępczej wypadkowej siły skrawania, co zapewniłoby realizację obciążeń zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy. Podstawową trudność w tych badaniach stanowi umieszczenie i zamocowanie siłownika między narzędziem i przedmiotem obrabianym, z czym Doktorant sobie świetnie poradził. Wydaje się, że dla klarowności rozprawy Autor mógłby uzasadnić wybór punktów pomiarowych i wyjaśnić czy był on związany z faktycznymi położeniami noży podczas obróbki kół jezdnych lub hamulcowych, czy też wynikał po prostu z możliwości zadawania obciążeń w przestrzeni roboczej tokarek.

W wyniku obciążania i odciążania układów konstrukcyjnych obu tokarek Autor wyznaczał charakterystyki sprężyste w postaci charakterystycznych statycznych pętli histerezy. Charakterystyki te były wynikiem superpozycji odkształceń sprężystych zespołów korpusowych oraz ich połączeń i miały charakter nieliniowy. W tego typu badaniach istotne jest, aby przed realizacją właściwych pomiarów zrealizować kilka cykli wstępnego obciążania – odciążania układu w celu ustabilizowania się pętli histerezy. Czy Doktorant zwrócił na to uwagę podczas badań? Problem stanowi również przyjęcie na podstawie pętli histerezy jednej wartości sztywności. Autor zaproponował trzy sposoby wyznaczania tej sztywności, ale jako miarodajną wartość przyjmował najmniejszą jej wartość. O ile metody A i B, zaproponowane

przez Doktoranta stanowiły pewien rodzaj uśrednienia wskaźników sztywności, to metoda C bazowała na wskaźnikach dla przyrostów obciążenia. Na ile, w tym ostatnim przypadku, wskaźniki mogłyby być miarodajne wobec nieliniowości układu? Analizując wyznaczone wskaźniki sztywności dla tokarki portalowej (tab. 5.5) zwraca uwagę stosunkowo niewielki rozrzut ich wartości. Natomiast w przypadku tokarki podtorowej (tab. 5.3) wskaźniki te mają znaczny rozrzut. Czym to można wytłumaczyć? Czy problemy mogły wynikać z przesztywnienia zamocowania siłownika w stykach z podparciem i z suwakiem (nożem)?

W dalszej części pracy Doktorant przeprowadził analizy numeryczne z wykorzystaniem pakietu oprogramowania *SolidWorks*. Wykazał się dużą biegłością w modelowaniu struktury obu obrabiarek, co wymagało wprowadzenia szeregu uproszczeń, doboru odpowiednich parametrów różnych materiałów, a nade wszystko doboru odpowiednich elementów stykowych prowadnic tocznych i złączy śrubowych. Modele obrabiarek nie uwzględniały mocowania i podparcia zestawów kołowych. Umożliwiały wyznaczenie wskaźników sztywności statycznej nie tylko dla położenia zespołów ruchowych stosowanych w badaniach eksperymentalnych, lecz również dla położenia, dla których niemożliwe byłoby przeprowadzenie takich badań z uwagi na niemożność wprowadzenia obciążenia w strukturach rzeczywistych.

Bardzo ciekawą część pracy stanowi porównanie wyników badań eksperymentalnych sztywności statycznej i wyników obliczeń. Szkoda, że Autor poprzestał na suchym zestawieniu tych wyników i nie pokusił się o komentarz. Na uznanie zasługuje uzyskanie relatywnie dobrej zgodności pomiędzy wynikami badań i obliczeń numerycznych, zwłaszcza w odniesieniu do tokarki portalowej, dla której dla wszystkich analizowanych położenia zespołów ruchowych obliczone wskaźniki sztywności mieściły się w przedziałach ograniczonych średnimi wartościami tych wskaźników, wyznaczonych dla lewego i prawego suportu. Dla tokarki podtorowej bardzo dobrą zgodność tych wskaźników uzyskano tylko dla jednego położenia przy obciążaniu obu suportów siłą zastępczą w kierunku odporowej składowej siły skrawania. Interesujące wydaje się pytanie z czego mogłyby wynikać rozbieżności obliczeniowych i eksperymentalnych wskaźników sztywności wyżej wspomnianej tokarki w pozostałych położeniach elementów ruchowych. W części analizowanych przypadków, pomimo symetrii układu konstrukcyjnego obu tokarek, występowały również rozbieżności między wyznaczonymi eksperymentalnie wskaźnikami sztywności dla lewego i prawego suportu. Czy różnice tych wskaźników były statystycznie istotne?

Powiązanie sztywności obrabiarki z dokładnością obróbki jest bardzo trudnym zadaniem. Dokładność ta jest najczęściej wyrażana odpowiednią klasą ISO, do której przypisane są odpowiednie wartości tolerancji zależne od wymiaru nominalnego. Dla obrabiarek średniej wielkości, które stanowią około 90% parku maszynowego, dopuszczalny procentowy udział odchyłek związanych z odkształceniami statycznymi wynosi około 25% pola tolerancji w danej klasie dokładności. Autor słusznie zwraca uwagę, że dla obrabiarek do obróbki zestawów kolejowych udział ten jest nieznany. Względne przemieszczenia między narzędziem a przedmiotem obrabianym mierzone podczas realizacji obciążeń statycznych struktury obrabiarki nie mają jednak bezpośredniego powiązania z dokładnością obróbki. Można co najwyżej przypuszczać, że większa sztywność układu nośnego obrabiarki będzie skutkowała mniejszymi odchyłkami wymiarowymi przedmiotów obrabianych, czyli większą jej dokładnością. W przypadku kolejnictwa normy podają zestaw parametrów technicznych dotyczących zestawu kołowego, które podlegają pomiarom i ocenie. Część z nich Doktorant wskazał w swojej rozprawie. Przeprowadzona przez niego analiza wpływu sztywności statycznej na dokładność toczenia profilu koła i jego średnicy przy założonych przekrojach wióra (różnych dla obu tokarek) ma słabe znaczenie praktyczne, bo nie odnosi się wprost do tych parametrów. Mogłaby być jednak przydatna do porównania różnych wariantów konstrukcyjnych tokarek tego samego typu.

Z dużym uznaniem zapoznałem się z wynikami optymalizacji topologicznej przeprowadzonej z wykorzystaniem modułu *Simulation Professional* oprogramowania *SolidWorks* na bazie modeli obliczeniowych obu tokarek. Procedurę zrealizowano dla płyt suportowych, suwaków głównych i suwaka do toczenia tarcz hamulcowych (dla tokarki UFD 140N). Wyniki analiz numerycznych zostały obszernie zilustrowane. Ich efektem jest sumaryczne zmniejszenie masy obu płyt i suwaków o 117 kg, co stanowi 9% masy wyjściowej. Zmianom tym towarzyszył tylko nieznaczny spadek sztywności tych zespołów. W przypadku suwaka do tarcz hamulcowych uzyskano wzrost sztywności o 52 do 183%, w zależności od kierunku obciążenia. Autor wykonał ogromną pracę przekładając wyniki tych analiz na opracowanie pełnej dokumentacji wdrożeniowej, którą zamieścił w oddzielnym załączniku do rozprawy. Bardzo interesujące byłoby oszacowanie, jak proponowane zmiany konstrukcyjne wpłynęłyby na koszt obrabiarki, biorąc pod uwagę względy technologiczne wykonania nowych korpusów.

4. Podsumowanie i konkluzja

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych, analiz numerycznych i prac projektowych mogę stwierdzić, że Autor w pełni dowiódł postawioną tezę pracy i zrealizował cel rozprawy doktorskiej. Za poprawne uznaję metodykę i sposób rozwiązania problemu badawczego, którą Autor przyjął w rozprawie. Komunikatywnie przedstawił On zarówno zastosowane podejście badawcze, jak i uzyskane wyniki. Zaprojektowane stanowisko badawcze wraz z oprogramowaniem, opracowane metodyka i program badań, przeprowadzone badania i analizy numeryczne oraz optymalizacja struktury nośnej dwóch obrabiarek specjalnych stanowiły kompleksowe podejście, które Doktorant wykorzystał do opracowania dokumentacji wdrożeniowej zmodyfikowanych konstrukcji zespołów ruchowych tych obrabiarek. Stanowi to niewątpliwie oryginalne i wartościowe osiągnięcie Doktoranta, z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

Stwierdzam, że mgr inż. **Tomasz Pochopień** wykazał się w rozprawie umiejętnością formułowania i samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych. Wykazał się również:

- ogólną wiedzą w zakresie budowy i badań eksperymentalnych obrabiarek,
- umiejętnościami w zakresie wykorzystania specjalistycznego oprogramowania *SolidWorks* do modelowania zespołów maszyn i do przeprowadzania analiz numerycznych metodą elementów skończonych,
- szczegółową wiedzą w zakresie projektowania zespołów konstrukcyjnych obrabiarek.

Uważam, że niniejsza rozprawa stanowi oryginalny i istotny wkład w zakresie badania własności statycznych obrabiarek specjalnych do zestawów kołowych oraz w zakresie modelowania i podejścia do optymalizacji zespołów funkcjonalnych tych maszyn. Tematyka rozprawy mieści się w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna. Osiągnięte wyniki mają zarówno znaczenie naukowe jak i użytkowe.

Stwierdzam, że rozprawa **mgra inż. Tomasza Pochopnia** pt. „*Badania odkształceń statycznych wybranych węzłów konstrukcyjnych obrabiarek do obróbki zestawów kolejowych*” w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r. (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

H. Słob...