

Dr hab. inż. Monika Madej, prof. PŚk  
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn  
Katedra Eksploatacji, Technologii Laserowych  
i Nanotechnologii  
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
27-314 Kielce

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Krystiana HADŁO**  
**pt. *Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na***  
***procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia***

Promotor pracy: ***dr hab. inż. Janusz Lubas***

**Podstawa opracowania:** pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz. (RM-530-10-02/2022) z dnia 30.11.2022 r.

### 1. Uzasadnienie podjętego problemu

Jednym ze sposobów zwiększenia trwałości eksploatacyjnej elementów metalowych systemu tribologicznego jest wytworzenie warstwy powierzchniowej o odpowiednich właściwościach mechanicznych oraz wysokiej odporności przeciwzużyciowej. Elementy układu tribologicznego narażone są na różnego rodzaju uszkodzenia, a ich trwałość eksploatacyjna zależy przede wszystkim od zastosowanych materiałów współpracujących tarciovo oraz środków smarowych. Eksploatacja smarowanych węzłów tarcia z powłokami niskotarciowymi stanowi poważne wyzwanie. Kluczowym problemem stał się dobór środków smarowych dedykowanych węzłom tarcia z elementami pokrytymi twardymi, cienkimi powłokami przeciwzużyciowymi. W literaturze przedmiotu brakuje danych dotyczących wpływu powszechnie stosowanych środków smarowych na charakterystyki tribologiczne

*Madej*

systemów z powłokami niskotarciowymi, przeciwzużyciowymi. Dotychczasowe prace wskazują na lukę badawczą w zakresie teoretycznych podstaw doboru środka smarowego i materiałów powłok do konkretnych zastosowań technicznych. Stale prowadzone są próby doboru tych środków na drodze eksperymentalnej. Wymusza to ciągłe doskonalenie klasycznych środków smarowych, zarówno tych stosowanych obecnie do stalowych węzłów tarcia, jak i poszukiwanie nowych o lepszych właściwościach użytkowych.

Problematyka badawcza recenzowanej pracy związana z modyfikacją warstw wierzchnich materiałów inżynierskich oraz charakterystyką ich właściwości tribologicznych jest bardzo złożona. Rozprawa nt.: „*Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia*” dotyczy określenia wpływu powłoki diamentopodobnej (DLC) domieszkowanej wolframem oraz kompozycji środków smarowych do zastosowania w smarowanych węzłach tarcia.

***Biorąc pod uwagę znaczenie i potencjalny zakres problematyki podjętej w pracy przez mgr inż. Krystiana Hadło uważam wybór tematu pracy doktorskiej za bardzo trafny i uzasadniony. Recenzowana praca mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna i dotyczy badania wpływu powłok diamentopodobnych domieszkowanych wolframem na właściwości eksploatacyjne w smarowanych systemach tribologicznych par trących metal – metal w styku rozłożonym i liniowym.***

## **2. Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Krystiana Hadło przedstawiona jest na 173 stronach i zawiera różnorodny materiał ilustracyjny w postaci 82 rysunków, fotografii i wykresów oraz 26 tabel. Praca poprzedzona jest wprowadzeniem, następnie zawiera 6 rozdziałów merytorycznych, spis cytowanej bibliografii, w której zamieszczono 103 pozycje literaturowe. Znaczną część cytowanych pozycji literaturowych stanowią publikacje wydane po roku 2000. Wybór literatury jest trafny i wyczerpujący. Praca zakończona jest streszczeniem w języku polskim i angielskim. Dysertacja ma klasyczny układ, tzn. została podzielona na dwie zasadnicze części: teoretyczną oraz doświadczalną. Część teoretyczna wraz z wstępem obejmuje 2 rozdziały, natomiast badania eksperymentalne zawierające opis zrealizowanych badań wraz z dyskusją wyników i wnioski końcowe kolejne 4. W pracy zamieszczono ponadto spis treści oraz spis ważniejszych skrótów i oznaczeń. Część związana z wprowadzeniem literaturowym (rozdziały 1-2) stanowi ok. 25 % tekstu, resztę stanowią rozdziały związane z badaniami własnymi Doktoranta.

Mgr inż. Krystian Hadło w pracy doktorskiej podjął się problematyki modyfikacji warstwy wierzchniej przez wprowadzenie do systemu tribologicznego powłok diamentopodobnych oraz oceny ich właściwości eksploatacyjnych poprzez wykonane badania tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia. Tytuł recenzowanej rozprawy koresponduje z treścią zawartą w pracy. Objętość rozprawy jest uzasadniona i wynika z potrzeby opisu rozważań teoretycznych oraz przeprowadzonych

eksperymentów. Rysunki oraz tabele zamieszczone w pracy wykonane są starannie i przejrzysto.

**Pod względem formalnym rozprawa została opracowana poprawnie, jej struktura odpowiada przyjętym zasadom, a treść poszczególnych rozdziałów rozmieszczona zgodnie z postawionymi celami.**

### 3. Ocena rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca ukierunkowana jest na problematykę z zakresu eksploatacji systemów tribologicznych. Dotyczy badań wpływu powłok diamentopodobnych domieszkowanych wolframem na właściwości wybranych smarowanych systemów tribologicznych. Ocenę ich funkcjonowania przeprowadzono na układach modelowych. Tematyka niniejszej rozprawy jest nowoczesna, aktualna i potrzebna. Na podstawie analizy przedmiotowej literatury Doktorant dokonał oceny czynników, które mogą mieć decydujący wpływ na właściwości eksploatacyjne.

Układ pracy jest prawidłowy, przejrzysty i konsekwentny, zgodny z zasadami twórczości naukowej. Po wstępie przedstawiono przegląd literatury i analizę aktualnego stanu wiedzy. Pozostałą część dysertacji stanowią badania własne. Praca napisana jest poprawną polszczyzną, a najważniejsze zauważone niezręczności w tym pojęciowe, zostały przedstawione w części *Uwagi i Wątpliwości*. Wykaz literatury obejmuje najnowsze badania i stan wiedzy związany z tematem pracy.

Wytyczone cele pracy sformułowane przez Doktoranta można podzielić na:

a) *Cel naukowy:*

**Wyznaczenie wpływu technologicznej powłoki na bazie morficznego węgla ( $\alpha$ -C:H:W) wytworzonej metodą PVD na elemencie pary ciernej i rodzaju oleju smarującego na procesy tarcia i zużycia zachodzące w warunkach ograniczonego smarowania.**

b) *Cel praktyczny*

**Zwiększenie trwałości węzłów ciernych, a docelowo poprawienie funkcjonalności układu mechanicznego, zmniejszenie zapotrzebowania na energię i zwiększenie parametrów eksploatacyjnych przy zachowaniu obecnego gabarytu węzła ciernego.**

Cele pracy zostały sformułowane prawidłowo i zawierają przede wszystkim aspekty naukowo-badawcze, które dodatkowo mogą mieć charakter użyteczny.

Po przeprowadzonej analizie literatury mgr inż. Ktystian Hadło poprawnie sformułował hipotezę badawczą pracy o następującej treści: **„Zastosowanie powłok na bazie amorficznego węgla  $\alpha$ -C:H:W w węzłach ciernych w styku rozłożonym i liniowym z udziałem materiałów konstrukcyjnych stosowanych w węzłach silników spalinowych, pracujących w warunkach ograniczonego smarowania syntetycznymi olejami silnikowymi może wpłynąć na poprawę właściwości tribologicznych w dynamicznie obciążonych parach ciernych przy zachowaniu istniejącej konstrukcji i warunków obciążenia”.**

Zakres pracy obejmował:

- przegląd i analizę literatury z zakresu węzłów tarcia, stosownych środków smarowych oraz powłok diamentopodobnych;
- opracowania metodyki badań;
- przeprowadzenie badań tribologicznych w styku rozłożonym i liniowym;
- przeprowadzenie badań przeciwzatarciowych stosowanych w pracy środków smarowych;
- analizę uzyskanych wyników, w oparciu o ocenę ilościową i jakościową wpływu powłok DLC i zastosowanego środka smarowego na parametry zarejestrowane podczas tarcia;
- określenia zużycia elementów węzła tarcia i ocena zmian zachodzących podczas tarcia elementów systemu tribologicznego.

Rozdziały 4-7 dotyczą badań własnych Doktoranta i ich analizy, podsumowania oraz wniosków końcowych.

W rozdziale czwartym Autor przedstawił obiekty i metodykę badań. Zaplanował szeroki zakres badań tribologicznych obejmujących: badania par trących pracujących w styku rozłożonym, a następnie w styku skoncentrowanym liniowym. Dodatkowo zaplanował wykonanie badań właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych przed i po eksploatacji – olejów zastosowanych we wcześniejszym etapie testów.

W rozdziale piątym zostały zaprezentowane wyniki badań skojarzenia rolka-klocek przeprowadzone na stanowisku badawczym T-05. Skojarzenie trące stanowiły: klocek ze stopu łożyskowego CuPb30 oraz rolka ze stali 34CrNiMo6 bez i z powłoką diamentopodobną typu a-C:H:W. Następnie Doktorant przedstawił wyniki badań w styku liniowym, podczas których płaska powierzchnia klocka ze stalowej płytki zaworowej regulatora luzu zaworowego współpracowała z rolką ze stali 34CrNiMo6. Doktorant przeprowadził także badania właściwości przeciwzatarciowych z wykorzystaniem aparatu czterokulowego T-02U olejów przed i po próbach tarciovych w styku liniowym..

Rozdział 6. stanowi podsumowanie badań i dyskusję wyników badań eksperymentalnych. Na podstawie uzyskanych wyników prac badawczych sformułowano wnioski zaprezentowane w rozdziale siódmym. Podane wnioski mają charakter bardzo szczegółowy i stanowią podsumowanie najważniejszych wyników badań.. Zabrakło jednak, w mojej ocenie, odniesienia do celów i hipotezy pracy.

#### **4. Uwagi i wątpliwości**

Podczas zapoznawania się z treścią rozprawy zrodziły się pewne uwagi i wątpliwości. Dlatego proszę o ustosunkowanie się do następujących pytań i zastrzeżeń:

- Zabrakło w analizie stanu wiedzy wyrażenia osobistego stosunku Autora do uzyskanych informacji.
- Dlaczego wybrano takie właśnie środki smarowe? W literaturze można znaleźć opisy wskazujące, że syntetyczne środki smarowe w postaci olejów silnikowych doskonale sprawdzające się w stalowych węzłach tarcia nie sprawdzają się w

przypadku stosowania powłok diamentopodobnych. Czy rozważał Pan przeprowadzenie badań dla innych substancji smarujących?

- Czy konieczne było przedstawianie uzyskanych wyników w postaci tabel i wykresów – moim zdaniem wystarczy jeden sposób przekazu
- Przedstawiony w pracy model systemu tribologicznego (Rys. 2.5) jest bardzo uproszczony. Proszę o prezentację pełnego modelu.
- Eksperymenty przeprowadzone na aparacie czterokulowym zostały przeprowadzone niezgodnie z normą, Dlaczego tak były realizowane?
- Zabrakło w podsumowaniu dokładnego wyjaśnienia przyczyn uzyskania takich wyników;

Ponadto w pracy niewłaściwie używane są pojęcia:

- „proces tarcia”, tarcie to zjawisko, a towarzyszą mu procesy zużywania;
- „nacisk” zamiast siła obciążająca lub obciążenie.

Pomimo powyższych uwag krytycznych, z całą pewnością stwierdzam, że Doktorant wykonał pracę badawczą wraz z wielowątkową analizą, wymagającą doświadczenia i samodyscypliny przy jej realizacji. Dysertacja dotyczy aktualnej wiedzy i w wielu miejscach wnosi nowe treści o znaczących walorach poznawczych i użytkowych. Przedstawiona do recenzji praca doktorska przedstawiona, pomimo moich uwag krytycznych, jest wartościowym opracowaniem naukowym i zawiera wnioski badawcze, które mają znaczenie aplikacyjne..

## 5. Wniosek końcowy

Podjęty przez Doktoranta temat jest ważny dla nauki w zakresie inżynierii mechanicznej, ze szczególnym uwzględnieniem tribologii materiałów inżynierskich. Recenzowana rozprawa posiada logiczną konstrukcję, typową dla prac naukowych bazujących na eksperymencie. Mgr inż. Krystian Hadło w rozprawie potwierdza znajomość literatury przedmiotu i problematyki dotyczącej eksploatacji smarowanych węzłów tarcia z powłokami diamentopodobnymi. Wiedzę tę właściwie potrafi wykorzystać podczas realizacji badań własnych. Dzięki wykonanym eksperymentom wykazał się znajomością zastosowanych metod badawczych. Doktorant zaplanował i przeprowadził plan badawczy, a postawione w pracy cele zrealizował, uzyskując rezultaty mające znaczenie aplikacyjne.

Po zapoznaniu się z pracą mgr inż. Krystiana Hadło pt. **Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia** uważam, że spełnia ona wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 20 lipca 2019 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.). Dlatego stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Krystiana Hadło do publicznej obrony.

Kielce, 13 marca 2023 roku

Mariusz Mady