

Radom, dnia 8.03.2023 r.

Dr hab. inż. Remigiusz Michalczewski  
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Technologii Eksploatacji  
ul. K. Pułaskiego 6/10; 26-600 Radom

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krystiana Hadło

Tytuł rozprawy:

*„Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia”*

Recenzja rozprawy doktorskiej została przygotowana zgodnie z uchwałą nr 05/11/2022 Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 30.11.2022 r., w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krystiana Hadło. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Janusz Lubas.

### 1. Charakterystyka ogólna

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 173 strony i składa się z 7 rozdziałów podzielonych na zwarte tematycznie podrozdziały. Zacytowano 103 pozycji bibliograficznych.

### 2. Ocena podjętego tematu

Tematyka pracy jest aktualna i naukowo uzasadniona. W pracy omówiono aktualny problem badawczy dotyczący wpływu zastosowania powłoki a-C:H:W osadzonej na elementach węzłów ciernych o styku konforemnym i niekonforemnym oraz olejów smarowych (silnikowych) na właściwości tribologiczne węzłów ciernych w warunkach ograniczonego smarowania. Podjęty temat wpisuje się w obecne trendy badań naukowych w obszarze zastosowania cienkich powłok przeciwzużyciowych, osadzanych metodami próżniowymi, na elementy smarowanych węzłów tarcia.

### 3. Tytuł pracy

Tytuł rozprawy: „Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia” oddaje jej zawartość.

### 4. Hipoteza, cele i zakres pracy

Na podstawie przeglądu literatury oraz wyników prac wstępnych Autor sformułował cel naukowy pracy, cel praktyczny oraz hipotezę.

Celem naukowym pracy było „Wyznaczenie wpływu technologicznej powłoki na bazie amorficznego węgla (a-C:H:W) wytworzonej metodą PVD na elemencie pary ciernej i rodzaju oleju smarującego na procesy tarcia i zużycia zachodzące w warunkach ograniczonego smarowania”. Cel pracy został sformułowany precyzyjnie.

Przyjęty przez Doktoranta cel praktyczny pracy to: „Zwiększenie trwałości węzłów ciernych, a docelowo poprawienie funkcjonalności układu mechanicznego, zmniejszenie zapotrzebowania na energię i zwiększenie parametrów eksploatacyjnych przy zachowaniu obecnego gabarytu węzła ciernego”. Cel praktyczny ma charakter uniwersalny. Stanowi on aktualne wyzwanie w odniesieniu do nowoprojektowanych układów mechanicznych.

Autor sformułował hipotezę: „Zastosowanie powłok na bazie amorficznego węgla a-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”. Hipoteza badawcza została sformułowana prawidłowo, zrozumiale i precyzyjnie.

Przedstawione cele i hipoteza dotyczą kwestii możliwości poprawy charakterystyk tribologicznych węzłów tarcia, w których na elementy trące zastosowano powłokę na bazie amorficznego węgla (a-C:H:W) wytworzoną metodą PVD. Temat zastosowania różnych wariantów powłok DLC, w tym z grupy a-C:H:Me od ponad dziesięciu lat jest w obrębie zainteresowań ośrodków naukowych w kraju i na świecie. Dotychczas wykazano korzyści z ich zastosowania w kilku obszarach, m.in. na powierzchni robocze kół zębatych, układy wtryskowe.

Dla wykazania słuszności przedstawionej hipotezy oraz osiągnięcia celów pracy Autor zaproponował bogaty plan badań eksperymentalnych. Obejmowały one badania rozruchu i zużycia skojarzeń ciernych w styku konforemnym (rozłożonym) i niekonforemnym (skoncentrowanym), w których na jeden z elementów trących zastosowano powłokę a-C:H:W. Obiektami badań w styku rozłożonym skojarzenia rolka-kłoczek (stanowisko T-05) był stop łożyskowy CuPb30 i stal 34CrNiMo6. W liniowym styku skoncentrowanym zaplanowano badania skojarzeń, w którym płaska powierzchnia klocka wykonana z płytki zaworowej regulatora luzu zaworowego współpracowała z rolką ze stali 34CrNiMo6. Założono, że pary cierne pracowały w warunkach ograniczonego smarowania, w których środkiem smarowym będą oleje silnikowe: nowy 5W40, zużyty 5W40, biodegradowalny 10W40 oraz kompozycja smarowa olej PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub>.

Postawiony cel naukowy pracy i hipoteza badawcza sugerują, że w rozprawie temat wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia zostanie rozwiązany kompleksowo. W zaplanowanych badaniach Doktorant zaplanował stosowanie materiałów skojarzeń testowych i parametrów badawczych modelujących warunki pracy węzłów tarcia w silniku spalinowym. Warunki badań w styku konforemnym odpowiadały pracy łożyska ślizgowego wału korbowego. Natomiast zastosowane parametry testów w styku liniowym odzwierciedlały pracę skojarzenia krzywka wałka rozrządu-popychacz w układzie rozrządu silnika spalinowego. W planie pracy nie uwzględniono badań pozwalających na kompleksowe rozwiązanie problemu doboru olejów smarowych do węzłów tarcia z elementami pokrytymi powłoką a-C:H:W. Dobór materiałów testowych, środków smarowych oraz metod badawczych ukierunkowany został na aspekty praktyczne zastosowania powłoki węglowej na elementach silnika spalinowego. Nie zaplanowano badań pozwalających na sformułowanie reguł i wytycznych o charakterze uniwersalnym.

Przedstawione cele pracy, hipoteza badawcza oraz zakres badań dotyczą aktualnego w technice wyzwania, jakim jest problem łącznej analizy wpływu zastosowania powłoki a-C:H:W na elementy węzłów tarcia silnika spalinowego oraz rodzaju środka smarowego, w tym także po okresie eksploatacji.

## 5. Układ pracy, redakcja, interpretacja wyników

Praca ma przejrzysty, klasyczny układ. Składa się z siedmiu rozdziałów oraz wykazu literatury, streszczenia i załączników. Pierwszy rozdział to wprowadzenie, w którym Autor określa zarys całej pracy. Przegląd literatury zaprezentowany w rozdziale drugim przedstawia aktualny stan wiedzy na temat procesów zużywania tribologicznego, klasyfikacji olejów silnikowych, technologii stosowanych w kształtowaniu węzłów ciernych oraz obecnego stanu prac badawczych nad zastosowaniem powłok typu DLC na elementy maszyn. Doktorant słusznie zauważa, że istotnym zagadnieniem w eksploatacji węzłów ciernych z powłokami węglowymi jest kwestia doboru środków smarowych. Liczne doniesienia literaturowe odnoszą się do korzyści wynikających z zastosowania powłok na podstawie badań przeprowadzonych w warunkach tarcia technicznie suchego lub przy smarowaniu olejami bazowymi. Doniesienia te jednak nie dostarczają wyczerpujących danych pozwalających na wnioskowanie o oddziaływaniu powłok DLC w smarowanych węzłach tarcia w silnikach spalinowych.

Następnie w rozdziale trzecim zostały podane cele, hipoteza oraz zakres pracy.

Rozdział czwarty został zatytułowany „Badania własne”. W rozdziale tym zawarto szczegółowy opis obiektów badań, metodyki badawczej oraz zastosowanych procedur. Na uwagę zasługuje bogaty plan badań tribologicznych. Doktorant zadeklarował, że badania wykonano z zastosowaniem dynamicznego randomizowanego programu badawczego, po czym przedstawia plan, w którym prace badawcze zostały podzielone na trzy jasno sprecyzowane etapy. W pierwszej kolejności zaplanowano badania par ciernych pracujących w styku rozłożonym, następnie w styku skoncentrowanym liniowym oraz dodatkowo badania właściwości przeciwwzartarciowych olejów przed i po badaniach w styku niekonforemnym. Tytuł rozdziału nie koresponduje z jego zawartością, gdyż sugeruje, że będzie zawierał wyniki badań, które zostały zwarte w rozdziale piątym zatytułowanym „Wyniki badań i ich interpretacja”.

W rozdziale piątym Doktorant w pierwszej kolejności zaprezentował wyniki badań skojarzenia rolka-klocek (stanowisko T-05), w którym klocek był wykonany ze stopu łożyskowego CuPb30 natomiast rolka ze stali 34CrNiMo6, a także z tejże stali pokrytej powłoką a-C:H:W. Badania obejmowały próby rozruchu (od 0 do 1 m/s), testy przy stałej prędkości (1 m/s) oraz próby zużyciowe w czasie 1000 s. Uzyskane wyniki wskazują na negatywny wpływ oleju po eksploatacji w silniku spalinowym („5W40 Zużyty”) w zasadzie na wszystkie badane charakterystyki tarciove. Zastosowanie powłoki a-C:H:W na stalowe rolki, w skojarzeniach smarowanych olejami silnikowymi, nie dało pozytywnych efektów. Spowodowało w większości przypadków wzrost momentu rozruchu, współczynnika tarcia i zużycia masowego stopu łożyskowego.

W dalszej części rozdziału Doktorant zaprezentował uzyskane wyniki badania par ciernych w styku liniowym, w którym płaska powierzchnia klocka wykonana ze stalowej płytki zaworowej regulatora luzu zaworowego współpracowała z rolką ze stali 34CrNiMo6. Podano wyniki prób rozruchu (od 0 do 0,7 m/s) oraz testów zużyciowych dla obciążeń węzła tarcia w zakresie od 1200 do 3000 N. Zastosowanie powłoki a-C:H:W na powierzchni płytki zaworowej w większości przypadków powodowało redukcję momentu rozruchowego, przy czym skala redukcji zależała od zastosowanego oleju smarowego i obciążenia węzła tarcia.

W badaniach zużyciowych, dla skojarzeń smarowanych olejami silnikowymi, uzyskano obniżenie wartości siły tarcia oraz spadek temperatur w parach ciernych z płytkami z powłoką a-C:H:W w stosunku do par ciernych z płytkami bez powłoki. Nie bez znaczenia był wpływ rodzaju oleju smarowego. W najbardziej skrajnym przypadku, węzeł tarcia z płytką bez powłoki smarowany olejem PAO8 z dodatkiem MoS<sub>2</sub> pod obciążeniem 2400 i 3000 N uległ zatarciu, podczas gdy pary z próbkami z powłoką a-C:H:W pracowały stabilnie bez zacierania.

Badania właściwości przeciwwzartarciowych olejów przed i po próbach zużycia w styku liniowym przeprowadzono z wykorzystaniem aparatu czteokulowego T-02U. Badania te ujawniły różnice pomiędzy olejem silnikowym 5W40 „Nowym” i „Zużytym”. Dla oleju „Nowego” uzyskano znacznie wyższe obciążenia zacierające P<sub>t</sub> po przekroczeniu którego następowała inicjacja zacierania. W badaniach zostało potwierdzone, że kompozycja olejowa PAO z MoS<sub>2</sub> nie jest optymalna pod względem zapewnienia właściwości przeciwwzartarciowych stalowego węzła tarcia, co poniekąd jest oczywiste, gdyż nie zawiera on dodatków typu EP (ang. *extreme pressure*). Pomimo, że czas badania w styku liniowym wynosił jedynie 1800 sekund, metoda czterokulowa pozwoliła na weryfikację, czy następuje utrata jakości olejów w trakcie eksploatacji. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdziły, że zmiany w olejach stosowanych do smarowania węzłów tarcia z powłoką a-C:H:W były mniejsze niż w skojarzeniach stalowych bez powłoki. Dla tychże olejów uzyskiwano wyższe wartości obciążenia zacierającego P<sub>t</sub>.

W rozdziale 6. zawarto podsumowanie badań i dyskusję wyników. Najważniejszym rezultatem przeprowadzonych badań było określenie wpływu powłoki a-C:H:W i rodzaju środka smarowego na charakterystyki tribologiczne w konforemnym i niekonforemnym skojarzeniu ciernym. Zastosowanie powłoki a-C:H:W na elementy trące silnika spalinowego nie w każdym przypadku było korzystne. Wykazano pogorszenie charakterystyk tribologicznych skojarzenia pracującego w styku rozłożonym, w którym następowała współpraca wycinka panwi łożysk ślizgowych ze stopu CuPb30 z pierścieniem stalowym z powłoką a-C:H:W w stosunku do pierścieni wykonanych bez powłoki. Natomiast zastosowanie powłoki a-C:H:W w skoncentrowanym styku liniowym, w którym węzeł tarcia stanowiła stalowa powierzchnia regulatorów luzu zaworowego współpracująca ze stalowym pierścieniem wpłynęło na poprawę warunków tarcia.

Na podstawie uzyskanych wyników prac badawczych sformułowano wnioski zaprezentowane w rozdziale siódmym. Podane wnioski mają charakter bardzo szczegółowy. Stanowią podsumowanie najważniejszych wyników badań. Doktorant nie sformułował wniosków o charakterze ogólnym, które można by wykorzystać w pracach naukowych lub innych zastosowaniach praktycznych. Nie odniósł się w nich również do postawionych celów i hipotezy prac. Analizując jednak ich treść należy uznać, że uzyskane wyniki badań potwierdziły słuszność hipotezy pracy. Wykazano, że możliwa jest poprawa właściwości tribologicznych par ciernych przy zachowaniu istniejącej konstrukcji i warunków obciążenia poprzez zastosowanie powłok na bazie amorficznego węgla a-C:H:W, przy czym korzystniej jest stosować powłoki w skojarzeniu elementów stalowych o styku skoncentrowanym. Nie wskazano na zasadne stosowanie powłoki w styku rozłożonym o parametrach odpowiadających pracy łożyska ślizgowego wału korbowego. Osiągnięty został cel pracy praktycznej pracy, gdyż uzyskano zwiększenie trwałości węzłów ciernych, a tym samym wskazano na poprawienie funkcjonalności układu mechanicznego, zmniejszenie zapotrzebowania na energię i zwiększenie parametrów eksploatacyjnych przy zachowaniu obecnego gabarytu węzła ciernego. Wyznaczono wpływ powłoki na bazie amorficznego węgla (a-C:H:W) wytworzonej metodą PVD na elemencie pary cierniej i rodzaju oleju smarującego na procesy tarcia i zużycia

zachodzące w warunkach ograniczonego smarowania, tym samym został uzyskany cel naukowy pracy.

Autor pracy jest świadomy, że zaprezentowana praca stanowi przyczynek do istniejącego stanu wiedzy i konieczne są dalsze prace w celu pełnego opisanie procesów i zjawisk przebiegających w węzłach ciernych z powłoką a-C:H:W w skojarzeniu z olejami smarowymi.

Pomimo, że praca napisana starannie, zrozumiale, poprawną polszczyzną i z użyciem właściwej terminologii technicznej Autor nie uniknął niedociągnięć. Niektóre z nich to:

- w pracy występuje sformułowanie, że „Wyróżnić można styk konforemny (rozłożony, powierzchniowy) i niekonforemny (liniowy)”, podczas gdy styk niekonforemny może być także punktowy, np. w łożyskach tocznych (str. 10),
- model systemu tribologicznego zaprezentowany na rys. 2.5 (str. 12) zaczerpnięty z materiałów reklamowych jest uproszczony, w przyszłości w pracy naukowej należy odnosić się przede wszystkim do recenzowanych prac naukowych,
- w zaprezentowanym podziale procesów zużywania na rys. 2.6 (str. 12) nie uwzględniono frettingu,
- powtarzanie wyników pomiarów w formie tabeli i wykresów (np. tab. 5.1 i wykresy na rys. 5.3),
- w pracy stosowano słowo nacisk w stosunku od siły obciążenia, co nie jest słuszne, gdyż nacisk odnosi się do siły działającej na jednostkę powierzchni (np. str. 117 w wyrażeniu „pod naciskiem 2400 i 3000 N”).

## 6. Uwagi merytoryczne

Lektura rozprawy skłania do refleksji nad poniżej sformułowanymi kwestiami.

- Charakterystyki tribologiczne skojarzeń elementów z powłokami są zależne od właściwości układu powłoka-podłoże. Czy dokonano pomiaru grubości, twardości i adhezji powłoki a-C:H:W osadzonej na stosowane w badaniach materiały testowe?
- Badania w styku rozłożonym obejmowały próby rozruchu (od 0 do 1 m/s), testy przy stałej prędkości (1 m/s) oraz próby zużyciowe w czasie 1000 s, dla nacisków jednostkowych 5, 10, 15, 20 MPa. Natomiast w styku liniowym wykonano próby rozruchu w zakresie prędkości od 0 do 0,7 m/s oraz próby zużycia pary cierniej w czasie 1800 s, przy obciążeniu 1200, 1800, 2400, 3000 N. Proszę uzasadnić przyjęte warunki badań.
- W pracy stosowano różne miary oporów ruchu, np. na rys. 5.1 i 5.2 współczynnik tarcia, na rys. 5.3 moment tarcia, a na rys. 5.4 i 5.5 siła tarcia. Proszę omówić czym się kierowano wybierając różne miary oporów ruchu dla tego samego stanowiska badawczego.
- Proszę omówić zastosowaną metodę badania właściwości przeciwwzartarciowych środków smarowych oraz przyjęte w badaniach kryterium wystąpienia zacierania.
- Jakimi wytycznymi należy się kierować przy doborze oleju do silnika, w którym zastosowano na elementy trące powłokę a-C:H:W?

Powyższe uwagi wyrażone w komentarzach i pytaniach, nie umniejszają merytorycznej wartości rozprawy. Proszę je potraktować jako zalecenie do uwzględnienia w przyszłych pracach i publikacjach.

## 7. Ocena dysertacji i wnioski końcowe

Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr. inż. Krystiana Hadło wpisuje się w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. W rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł literaturowych świadcząca o dużej wiedzy Autora. Prawidłowo sformułowano problem badawczy i określono jego cel naukowy, cel praktyczny oraz hipotezę badawczą. Zaplanowano i zrealizowano badania stosując nowoczesne narzędzia naukowe według przyjętej metodyki badań. Logicznie zinterpretowano uzyskane wyniki i sformułowano wnioski, co wskazuje na dobre przygotowanie merytoryczne Kandydata. Stopień rozwiązania zagadnienia oceniam jako dobry. Doktorant udowodnił słuszność postawionej hipotezy oraz osiągnął cele pracy.

Reasumując uważam, że recenzowana rozprawa została poprawnie skonstruowana pod względem merytorycznym i językowym. Rozprawa stanowi niewątpliwą wkład do istniejącego stanu wiedzy. Zawarty w niej materiał badawczy jest oryginalnym dorobkiem Doktoranta - ma on walory poznawcze i praktyczne. Zawartość rozprawy świadczy o dobrym przygotowaniu Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Biorąc pod uwagę powyższe fakty, stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Krystiana Hadło pt. „Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w rozumieniu Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 roku, poz. 1669), Ustawy z 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2016 roku poz. 882 ze zmianą: Dz. U. z 2016 roku poz. 1311) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2016 roku poz. 1586).

Niniejszym wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony, a po jej pomyślnym przebiegu, o nadanie mu stopnia doktora.

