



Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Krystian Hadło

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

dr hab. inż. Grzegorz Zając, prof. PK

Kraków, dnia 13 marca 2023 r.

Podpis:

## 1. Ocena celowości podjęcia problematyki

Procesy tribologiczne stanowią kluczowy obszar problematyki zapewnienia wymaganej niezawodności i trwałości obiektów technicznych zawierających w swej budowie węzły tarcia. Dotyczy to w szczególności maszyn i pojazdów dla których rosnące wymagania związane z wysoką efektywnością energetyczną, wymuszają stosowane rozwiązań minimalizujących straty w węzłach tarcia poprzez aplikację zawansowanych technologicznie środków smarnych w synergii z powłokami przeciwzużyciowymi o właściwościach tzw. niskotarciowych. Podjęta przez mgr inż. Krystiana Hadło problematyka wpisuje się w strategiczny obszar badań naukowych tribologicznych, prac projektowych, prac wdrożeniowych zmierzających do systemowego zwiększenia trwałości eksploatacyjnej smarowanych węzłów tarcia, poprzez zabezpieczenie warstwy wierzchniej powłokami z węglem amorficznym. Przeprowadzone przez Autora badania tribologiczne, połączone z krytyczną analizą jakościową i ilościową otrzymanych wyników wykazują duży potencjał poznawczy. Badania te w pewnej mierze rozwijają istniejący stan wiedzy związany z praktyczną aplikacją wybranych środków smarnych w węzłach tarcia zabezpieczonych technologicznie przed przyspieszonym zużyciem obróbką cieplną lub powłoką a-C:H:W. Systematyczne i szczegółowe przedstawienie w formie tabelarycznej oraz graficznej wyników pomiarów, pozwala na ich autorską ocenę, a także praktyczne wykorzystanie jako bazy w rozwijaniu istniejących rozwiązań, jak również kwantyfikacji działań empirycznych, prowadzących do tworzenia nowych rozwiązań ograniczających intensywność zużycia elementów par ciernych w węzłach tarcia z ograniczonym smarowaniem. Ze względu na powszechność występowania w technice węzłów tarcia, pracujących w trudnych warunkach przy ograniczonym smarowaniu, wszelkie badania prowadzące do osiągnięcia większej trwałości elementów węzła tarcia oraz mechanizmów maszyn mają bardzo duże znaczenie nie tylko naukowe, poznawcze, ale w sposób szczególny użyteczne np. w przemyśle maszynowym, transporcie i szeroko pojętej gospodarce.

Przedstawione w recenzowanej pracy dysercyjnej nt.: „Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia” wyniki badań, stanowią ważny wkład w rozwój istniejących metod zwiększających trwałość eksploatacyjną elementów węzłów tarcia ze stykiem konforemnym i niekonforemnym.

Wybór tematyki pracy mgr inż. Krystiana Hadło należy uznać za uzasadniony zarówno z punktu widzenia naukowego jak i praktycznego, aplikacyjnego. Otrzymane wyniki mogą stanowić także cenną bibliografię uzupełniającą programów bloków dydaktycznych związanych z tribologią i eksploatacją maszyn.

## 2. Omówienie rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Krystiana Hadło nt.: „Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia” składa się z siedmiu ponumerowanych rozdziałów. Na końcu pracy Autor zamieścił: Literaturę, Streszczenie, Abstrakt i Załączniki. Całość pracy liczy 173 strony. Na początku pracy zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń, wprowadzenie oraz analizę literatury z dziedziny obejmującej problematykę badawczą pracy. W ostatniej części pracy Autor zawarł spis literatury zawierający 103 pozycje w większości anglojęzyczne. Zgodnie z obowiązującymi wymogami formalnymi praca zawiera również streszczenie w języku polskim i angielskim oraz kompleksowy spis rysunków i tabel.

Pierwszy rozdział pracy obejmuje wprowadzenie do obszaru podjętej problematyki badawczej ze wskazaniem uzasadnienia merytorycznego, szczególnie w obszarze zagadnień konstrukcyjnych i eksploatacyjnych silników spalinowych. W rozdziale drugim została przedstawiona obszerna analiza literatury obejmująca m.in.:

- charakterystykę węzłów ciernych,
- zużycie tribologiczne elementów węzła ciernego,
- klasyfikację i charakterystykę olejów silnikowych,
- technologie stosowane w kształtowaniu węzłów ciernych,
- skojarzenia tribologiczne z warstwami powierzchniowymi z węglem amorficznym,
- proces kształtowania warstwy powierzchniowej z węglem amorficznym,
- właściwości tribologiczne warstw powierzchniowych z węglem amorficznym,
- podsumowanie przeglądu literatury.

Poprawnie przeprowadzona analiza stanu wiedzy pozwoliła Autorowi na wskazanie w kolejnym rozdziale przyjętego celu pracy, hipotezy naukowej oraz zakresu pracy. Cel pracy został podzielony na szczegółowe cele obejmujące:

- **Cel naukowy** - „Wyznaczenie wpływu technologicznej 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”.
- **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”.

W pracy została zawarta również **Hipoteza badawcza**, sformułowana następująco: „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”. Z powyższych wynikał opracowany **Zakres pracy** pozwalający na osiągnięcie celu naukowego i weryfikację prawdziwości przyjętej hipotezy badawczej.

Zakres pracy obejmuje:

- a) przegląd literatury krajowej i zagranicznej dotyczącej węzłów ciernych, środków smarowych oraz powłok DLC, w tym powłok typu a-C:H:W,
- b) opracowanie metodyki badań skojarzeń tribologicznych w warunkach ograniczonego smarowania,
- c) przeprowadzenie porównawczych badań tribologicznych par ciernych pracujących w styku rozłożonym i liniowym,
- d) badania właściwości przeciwzatarciowych zastosowanych środków smarowych przed i po badaniach w niekonforemnym węźle tarcia,
- e) analizę uzyskanych wyników:
  - określenie ilościowego i jakościowego wpływu ukształtowanej warstwy powierzchniowej elementu węzła ciernego (powłoki na bazie amorficznego węgla a-C:H:W) wytworzonej metodą PVD na elemencie pary cierniej i rodzaju środka smarowego (syntetyczne oleje silnikowe) na parametry współpracy pary cierniej (współczynnik tarcia, moment rozruchowy, siła tarcia i temperatura w obszarze tarcia) w styku konforemnym i niekonforemnym,
  - wyznaczenie zużycia elementów węzłów ciernych i określenie zmian w strukturze warstwy powierzchniowej ukształtowanej w procesie tarcia,
- f) podsumowanie przeprowadzonych badań i przedstawienie wniosków.

Kolejny bardzo ważny rozdział czwarty pracy opisuje szczegółowo metodykę badań, aparaturę badawczą oraz właściwości badanych elementów skojarzenia ciernego i wykorzystanych w badaniach środków smarnych. Autorska metodyka spełniająca zasadnicze wymagania teorii eksperymentu i potencjalne możliwości badań układów złożonych o dużej liczbie czynników zakłócających obejmuje m.in.:

- a) badania skojarzeń ciernych w styku konforemnym,
- b) rozruch pary cierniej w styku konforemnym,
- c) próby pary cierniej w warunkach ustalonej prędkości ślizgania,
- d) zużycie pary cierniej w skojarzeniu konforemnym,
- e) badania skojarzeń ciernych w styku niekonforemnym,
- f) rozruch pary cierniej w styku niekonforemnym,
- g) zużycie elementów pary cierniej w styku niekonforemnym,
- h) badania właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych.

Przedstawiona w tym rozdziale metodyka badań zgodna z użytym planem badawczym determinuje zaprezentowane w kolejnym rozdziale szczegółowe wyniki badań oraz ich interpretację. Rozdział piąty jest efektem konsekwentnie zrealizowanej metodyki badań własnych, szczegółowo potwierdzonej wynikami badań obejmujących następujące zagadnienia:

- a) procesy tribologiczne w węzłach ciernych o styku konforemnym,
  - analizę warunków tarcia w parze ciernej,
  - zmiany chropowatości warstwy powierzchniowej elementów pary ciernej,
- b) procesy tribologiczne w węzłach ciernych o styku niekonforemnym,
  - analizę parametrów tarcia pary ciernej,
  - ocenę stanu warstwy powierzchniowej elementów pary ciernej,
  - zmiany chropowatości warstwy powierzchniowej elementów pary ciernej,
- c) ocenę właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych,
  - porównanie właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych,
  - ocenę stanu warstwy powierzchniowej elementów pary ciernej.

Przedstawione wyniki badań wraz z ich interpretacją, wskazują na właściwe, metodyczne podejście Autora do rozwiązywania złożonych problemów badawczych. Rozdział ten stanowi niejako kluczową część pracy, potwierdzającą zarazem zdolność Doktoranta do samodzielnego realizowania prac badawczych.

W rozdziale szóstym zawarto obszernie podsumowanie zrealizowanych badań empirycznych połączone z rozszerzoną polemiką w dziedzinie uzyskanych rezultatów. Całość pracy komplementarnie zamyka rozdział siódmy obejmujący merytorycznie uzasadnione wnioski. Rozdział ten potwierdza osiągnięcie przyjętych celów oraz zrealizowanie pełnego zakresu pracy sformułowanego w rozdziale „CEL, HIPOTEZA NAUKOWA I ZAKRES PRACY”. Wskazuje także proponowane przez Autora kierunki dalszych prac badawczych.

### **3. Merytoryczna ocena pracy**

Przedstawiona do recenzji praca wpisuje się koherentnie w globalny trend zwiększania trwałości elementów maszyn i pojazdów, w których występują złożone układy mechaniczne oparte na węzłach tarcia pracujących w trudnych warunkach zmiennych obciążeń dynamicznych. Trend ten występuje w synergii z pożądanym zwiększaniem efektywności energetycznej układów napędowych i minimalizacją dysypacji energii. Chodzi tu głównie o straty determinowane oporami ruchu w warunkach ograniczonego smarowania węzłów łożyskowych lub wykonawczych mechanizmów maszyn. Na podstawie pogłębionej analizy pracy można potwierdzić dużą wiedzę Autora w obszarze podejmowanych wyzwań badawczych, stanowiącą stabilną podstawę do wypracowania skutecznej strategii rozwiązania

problemu naukowego z użyciem skwantyfikowanych narzędzi i metod badawczych. Doktorant z dużą biegłością m.in. przy wykorzystaniu aparatury pomiarowej i metod opracowanych w Instytucie Technologii Eksploatacji, będącym od lat pionierem i liderem w interdyscyplinarnej problematyce dotyczącej tarcia, zużycia, smarowania elementów maszyn, zrealizował złożone wieloetapowe zadanie badawcze oparte o autorską metodykę badań. Metodykę spełniającą wymogi dla badań empirycznych realizowanych z wykorzystaniem metod i urządzeń badawczych z zakresu szeroko pojętej tribologii. Autor przygotowując próbki do badań zdecydował się wykorzystać zawansowane technologie kształtowania parametrów warstwy wierzchniej poprzez obróbkę cieplną, utwardzanie powierzchniowe lub zastosowanie powłoki ochronnej na bazie amorficznego węgla a-C:H:W. Widoczna jest również wysoka dbałość o zachowanie podobieństwa geometrycznego i wartości obciążeń identyfikowanych w rzeczywistych węzłach tarcia układu czop – panewka, krzywaka wałka rozrządu silnika - płytki kompensacyjna (regulacyjna) popychacza zaworowego. Dopełniając całości zastosował również środki smarne na bazie olejów syntetycznych, przeznaczone do pracy w układach smarowania silników spalinowych, przybliżając tym samym eksperyment jeszcze bardziej do warunków rzeczywistych, występujących w eksploatacji silników. Uzyskane rezultaty badań mają nie tylko wysokie walory naukowe, ale również użytkowe prowadzące do rozwoju koncepcji modyfikacji, tworzenia nowych rodzajów zabezpieczeń warstwy wierzchniej elementów pary ciernej, zmniejszających zużycie i opory tarcia. Może to również implikować do działań prowadzących w kierunku ograniczenia energochłonności układów napędowych współczesnych maszyn przemysłowych. Autor konsekwentnie realizując zaplanowane etapy badawcze i kompleksowo przedstawiając ich wyniki ułatwia innym badaczom poszerzenie własnego pola doświadczeń. Słusznie stwarzając możliwość ich wykorzystania do uzyskania efektywniejszych rozwiązań z wysokim potencjałem wdrożeniowym. Odnosząc się do całości pracy należy podkreślić jej spójny, poprawny układ, właściwie nawiązujący analizą literatury do działań, które Autor przeprowadza w kolejnych rozdziałach pracy. Przyjęte cele zarówno te naukowe, poznawcze jak i użytkowe zostały zrealizowane w zakresie pełnym, odpowiadającym przyjętej metodyce badań własnych. Przedstawione w pracy badania tribologiczne i analizy odpowiadają standardom prac naukowych, a uzyskane wyniki mają wysoką wartość merytoryczną. Tego typu badania, pogłębione analizy są bardzo pożądane, nie tylko z punktu widzenia osiągnięć naukowych, ale również w dziedzinie rozwoju nowych rozwiązań technicznych w silnikach i stosowania powłok zabezpieczających. Powłok nie ulegających przyspieszonej delaminacji. Znane są bowiem w eksploatacji silników takie przypadki, dotyczące nawet wiodących producentów pojazdów, w których szybkie uszkodzenie powłoki zabezpieczającej doprowadziło do uzyskania efektu odwrotnego do zamierzonego, czyli znaczącego ograniczenia trwałości. Osiągnięte w pracy rezultaty potwierdzają szczególnie

istotną rolę doboru środków smarnych do smarowania węzłów z powłokami DLC pozwalających uzyskać synergę działania smarnego, przeciwzużycowego oleju i wysokiej odporności powłoki.

Przesłana do recenzji praca nt. „Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia”, znacząco uzupełnia potencjał wiedzy w obszarze badań tribologicznych węzłów tarcia, zabezpieczonych powłoką a-C:H:W, smarowanych wybranymi olejami silnikowymi. Praca może być pomocna w dalszym rozwoju prac eksperymentalnych, realizacji badań eksploatacyjnych obserwowanych i docelowo wdrożenia na skalę przemysłową tego typu rozwiązań.

#### 4. Uwagi

Recenzowana praca zredagowana jest bardzo starannie i poprawnie stylistycznie, lecz mimo wysokiej dbałości Autora sporadycznie występują drobne błędy stylistyczne lub tzw. literówki. Autor również często używa określenia „żywołność” w odniesieniu do obiektów technicznych, proponowałbym raczej użyć określenia „trwałość”, co w przypadku obiektów nieożywionych jest bardziej zasadne i zgodne z przyjętą nomenklaturą Polskiego Naukowo Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego. W wersji drukowanej pracy ze względu na mały rozmiar czcionki i niską rozdzielczość zdarzają się nieczytelne rysunki. W przedmiotowej pracy nie stwierdzono jednak istotnych błędów merytorycznych, mogących prowadzić do błędnych wniosków, a specjalistyczne słownictwo techniczne jest użyte poprawnie.

W mojej opinii celowym byłoby wykorzystanie w prowadzonych badaniach analizy z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej SEM/EDS, którą Autor wskazał jako planowaną do użycia w dalszych badaniach. Można by również przy opisie badań i prezentacji wyników zamieścić nie tylko wartość średnią mierzonych parametrów z trzech pomiarów nie różniących się od siebie o więcej niż 10%, ale również fakultatywnie medianę z wszystkich testów badawczych oceniających dla danych warunków. Mimo pozytywnej oceny całości pracy nasuwa się kilka pytań:

- Dlaczego w przyjętej metodyce badań nie uwzględniono chociaż kilku testów długotrwałych?
- Dlaczego nie pokazano ani jednego obrazu powierzchni współpracy kulki górnej z kulkami dolnymi w testach z wykorzystaniem testera T-02U?
- Czy rozważano przeprowadzenie analogicznych badań skojarzeń ciernych na testerze t-05 jednak w ruchu oscylacyjnym?
- Jaki jest wpływ na pracę węzła tarcia cząstek, uszkodzonych fragmentów powłoki a-C:H:W, które przedostają się do oleju?

- Jakiej wielkości są te cząstki i czy klasyczny system filtracji oleju silnikowego z filtrem bocznikowym i wkładem filtracyjnym papierowym jest w stanie skutecznie wychwycić te cząstki?

Przywołane uwagi i spostrzeżenia mają bardziej charakter informacyjny, nie umniejszają tym samym zasadniczych walorów merytorycznych pracy.

## 5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Krystian Hadło nt.: „Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia” jest poprawnie zredagowana, cechuje się również dobrym poziomem merytorycznym. Szczegółowa analiza treści pracy wskazuje na odpowiedni poziom wiedzy teoretycznej, kompetencje i umiejętności Doktoranta do efektywnego prowadzenia badań naukowych, praktycznej implementacji ich wyników do zastosowań technicznych, co jest szczególnie ważne z punktu widzenia stymulacji rozwoju wdrożeń przemysłowych. Potwierdzona biegłość mgr inż. Krystian Hadło w prowadzonych badaniach, umiejętność efektywnego wykorzystania wyników badań naukowych do rozszerzania dorobku publikacyjnego i w perspektywie potencjału prowadzenia prac wdrożeniowych pozwala na wysoką ocenę. Praca stanowi oryginalny dorobek Autora i ma znaczący wkład w dziedzinę badań naukowych związanych z rozwijaniem nowych sposobów skutecznej ochrony przeciwzużyciwej warstwy wierzchniej stref kontaktu węzłów tarcia w układach napędowych maszyn i pojazdów.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska nt.: „Analiza wpływu powłoki a-C:H:W oraz olejów smarowych na procesy tribologiczne w smarowanych węzłach tarcia” wykazuje wysoką wartość dodaną w obszarze zastosowania powłok na bazie amorficznego węgla a-C:H:W w węzłach ciernych w styku rozłożonym i liniowym. Dotyczy to w szczególności materiałów konstrukcyjnych obecnie stosowanych w węzłach ciernych silników spalinowych, pracujących w warunkach ograniczonego smarowania syntetycznymi olejami silnikowymi. Szeroki zakres pracy zrealizowany z należytą starannością w oparciu o oryginalną metodykę badań, w ujęciu komplementarnym z dorobkiem publikacyjnym Doktoranta stanowi podstawę do pozytywnej oceny całości pracy mgr inż. Krystiana Hadło.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia w związku z tym wymagania stawiane pracom doktorskim określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym (tekst ujednolicony Dz. U. z 2016 r. poz. 882, 1311, z 2017 r. poz. 859). Wniosuję zatem o dopuszczenie mgr inż. Krystiana Hadło do publicznej obrony w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.

