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

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. *Macieja Daszykowskiego*

pt. „Wpływ powłoki amorficznego węgla a-C:H:W oraz stopnia zużycia syntetycznych olejów silnikowych na właściwości tribologiczne smarowanych węzłów tarcia"

Promotor pracy: dr hab. inż. Janusz Lubas

Podstawa opracowania: pismo z dnia 8 lipca 2026 roku Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta (RM-530-04-03/2026), w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej z dnia 8 lipca 2026 roku.

OCENA DOBORU PROBLEMATYKI BADAWCZEJ I TEMATU ROZPRAWY

Rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Daszykowskiego pt. **„Wpływ powłoki amorficznego węgla a-C:H oraz stopnia zużycia syntetycznych olejów silnikowych na właściwości tribologiczne smarowanych węzłów tarcia”** podejmuje aktualną i istotną problematykę naukową z zakresu tribologii, inżynierii powierzchni oraz eksploatacji maszyn. Tematyka pracy koncentruje się na możliwości poprawy właściwości eksploatacyjnych skojarzeń współpracujących tarciowo poprzez zastosowanie powłok na bazie amorficznego węgla oraz odpowiedni dobór środków smarowych, z uwzględnieniem zmian ich właściwości zachodzących podczas stosowania. Zagadnienia te mają istotne znaczenie w kontekście zwiększenia trwałości i niezawodności elementów maszyn, ograniczania strat energii wynikających z tarcia oraz zmniejszania intensywności zużywania.

Wybór powłoki a-C:H:W jako przedmiotu badań należy uznać za uzasadniony ze względu na jej właściwości mechaniczne i tribologiczne oraz możliwości zastosowania w elementach pracujących w warunkach intensywnych oddziaływań kontaktowych. Powłoki diamentopodobne DLC od wielu lat stanowią przedmiot zainteresowania badaczy, jednak ich właściwości użytkowe są silnie uzależnione od warunków współpracy z materiałem przeciwpróbki, rodzaju obciążenia oraz właściwości środka smarowego. Szczególnie ważne jest zatem rozpoznanie ich zachowania w rzeczywistych skojarzeniach materiałowych, w których korzystne właściwości przeciwzużyciowe samej powłoki nie muszą oznaczać poprawy trwałości całego węzła tarcia.

Za właściwe uważam również uwzględnienie w badaniach syntetycznych olejów silnikowych na różnym etapie eksploatacji. W większości rzeczywistych układów tribologicznych środek smarowy podlega stopniowej degradacji wskutek oddziaływań termicznych, mechanicznych i chemicznych, a także poprzez zanieczyszczenie produktami zużycia. Zmiany te mogą istotnie wpływać na przebieg tarcia, tworzenie warstw granicznych oraz odporność współpracujących powierzchni na zużywanie i zacieranie. Z tego względu ocena skojarzeń ciernych smarowanych olejami nowymi oraz olejem po rzeczywistej eksploatacji stanowi wartościowe rozszerzenie problematyki badawczej i wzmacnia jej związek z praktyką inżynierską. Na podkreślenie zasługuje przyjęcie dwóch modeli skojarzeń trących, obejmujących styk konforemny i niekonforemny, odwzorowujących wybrane rozwiązania konstrukcyjne stosowane w silnikach spalinowych. Takie podejście umożliwia rozpoznanie wpływu geometrii styku na skuteczność zastosowania powłoki a-C:H:W oraz ocenę oddziaływań zachodzących pomiędzy materiałami współpracujących elementów. Szczególne znaczenie poznawcze ma uwzględnienie w badaniach stopu łożyskowego CuPb30, ponieważ wyniki rozprawy wskazały, że zastosowanie powłoki węglowej na współpracującym pierścieniu stalowym może powodować znaczące zwiększenie zużycia tego materiału. Potwierdza to zasadność rozpatrywania procesów tribologicznych w odniesieniu do całego skojarzenia ciernego, a nie wyłącznie do właściwości pojedynczego elementu.

Przyjęta problematyka badawcza ma charakter zarówno poznawczy, jak i aplikacyjny. Jej wartość naukowa wynika przede wszystkim z analizy wzajemnych zależności pomiędzy właściwościami warstwy powierzchniowej, stanem środka smarowego, geometrią styku oraz warunkami obciążenia. W wymiarze praktycznym uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do bardziej świadomego doboru materiałów i środków smarowych w projektowaniu oraz eksploatacji węzłów tarcia. Oryginalność podjętych badań należy przy tym wiązać przede wszystkim z przyjętą koncepcją eksperymentalną i kompleksową analizą oddziaływań tribologicznych, a nie z opracowaniem nowego rodzaju powłoki czy technologii jej wytwarzania.

Nieco ostrożniej należałoby również interpretować możliwość bezpośredniego przenoszenia uzyskanych wyników na rzeczywiste warunki pracy silników spalinowych. Chociaż zastosowane modele laboratoryjne nawiązują do wybranych skojarzeń występujących w układach korbowych i rozrządu, nie odwzorowują w pełni zmiennych warunków obciążenia, temperatury, prędkości ślizgania oraz zasilania środkiem smarnym charakterystycznych dla rzeczywistej eksploatacji. Nie podważa to zasadności wyboru problematyki, lecz wskazuje na konieczność odpowiedniego ograniczenia zakresu formułowanych uogólnień aplikacyjnych.

Podsumowując, dobór problematyki badawczej oceniam pozytywnie. Podjęte zagadnienia są aktualne, naukowo uzasadnione i istotne z punktu widzenia rozwoju wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Przedstawiony problem badawczy jest dostatecznie złożony i obejmuje wzajemnie powiązane zagadnienia dotyczące inżynierii powierzchni, procesów tarcia i zużywania oraz eksploatacji środków smarowych. Za szczególnie wartościowe uznaję uwzględnienie dwóch rodzajów styków tribologicznych i wykazanie zróżnicowanego wpływu powłoki a-C:H:W na właściwości współpracujących materiałów, zwłaszcza na zużywanie stopu łożyskowego CuPb30. Tytuł rozprawy zasadniczo odpowiada jej zawartości.

ZAKRES, CHARAKTERYSTYKA I OCENA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Daszykowskiego została przedstawiona na 179 stronach tekstu i zawiera różnorodny materiał ilustracyjny w postaci 79 rysunków, fotografii i wykresów

przedstawiających obrazy z przeglądu literatury, aparaturę i metodykę badań oraz wyniki analiz tribologicznych oraz 30 tabel ze szczegółowymi danymi parametrów technicznych, wynikami testów oraz analizami porównawczymi.

Praca doktorska poprzedzona jest spisem treści (2 str.) oraz wykazem ważniejszych oznaczeń (1 str.). Zawiera wprowadzenie (3 str.), analizę literatury (4 str.) cztery rozdziały merytoryczne (115 str.), a zakończona została wnioskami, w których zawarto także kierunek dalszych badań (6 str.). Spis cytowanej literatury obejmuje łącznie 124 pozycje, w tym 1 współautorską doktoranta oraz strony internetowe. Znaczną część cytowanych pozycji literaturowych stanowią publikacje aktualne. Dobór literatury jest zasadniczo właściwy pod względem tematycznym, jednak wymaga aktualizacji, szczególnie w zakresie obowiązujących specyfikacji olejów silnikowych oraz najnowszych badań nad oddziaływaniem powłok a-C:H:W ze środkami smarnymi i materiałami przeciwpróbek. Praca napisana została w układzie klasycznym, tzn. podzielona na dwie zasadnicze części: teoretyczną oraz doświadczalną. Objętość rozprawy jest uzasadniona i wynika z potrzeby opisu rozważań teoretycznych, metodycznych, przeprowadzonych eksperymentów oraz ich interpretacji.

Tytuł recenzowanej rozprawy „***Wpływ powłoki amorficznego węgla a-C:H:W oraz stopnia zużycia syntetycznych olejów silnikowych na właściwości tribologiczne smarowanych węzłów tarcia"*** raczej koresponduje z treścią zawartą w pracy. Pewne zastrzeżenia budzi natomiast **precyzja jego sformułowania**, szczególnie w części odnoszącej się do „stopnia zużycia syntetycznych olejów silnikowych". Określenie to sugeruje przeprowadzenie systematycznych badań obejmujących różne, ilościowo zdefiniowane stopnie degradacji środka smarowego. Tymczasem zasadniczy program eksperymentalny obejmuje porównanie nowego oleju SAE 5W30 z olejem tego samego rodzaju po eksploatacji wynoszącej około 8000 km oraz dodatkowo nowego oleju SAE 5W40. Chociaż Autor uwzględnił również zmiany właściwości olejów po kolejnych próbach tribologicznych, nie przeprowadził pełnej, ilościowej charakterystyki ich stopniowej degradacji, obejmującej na przykład zmiany lepkości, liczby kwasowej i zasadowej, produktów utleniania czy zawartości dodatków uszlachetniających. Dlatego bardziej precyzyjne byłoby zastosowanie w tytule określenia **„stan eksploatacyjny olejów silnikowych"** zamiast „stopień zużycia". Pod względem formalnym rozprawa została opracowana poprawnie, jej struktura odpowiada przyjętym zasadom, a treść poszczególnych rozdziałów rozmieszczona jest zgodnie z postawionymi celami. Doktorant na początku przedstawił problem badawczy, sformułował cele badawcze, następnie dokonał analizy stanu wiedzy, po czym przeprowadził szereg badań i analiz, na podstawie których sformułował wnioski końcowe i określił kierunki dalszych badań. Praca zawiera także streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił problematykę tarcia i zużywania elementów maszyn, wskazując na ich znaczenie dla trwałości, niezawodności oraz sprawności energetycznej układów mechanicznych. Omówiono podstawowe zjawiska fizyczne zachodzące podczas współpracy elementów skojarzeń ciernych oraz czynniki determinujące intensywność procesów zużywania. Szczególną uwagę zwrócono na znaczenie właściwości warstw powierzchniowych, doboru materiałów konstrukcyjnych oraz warunków smarowania dla zapewnienia prawidłowego funkcjonowania węzłów tribologicznych. Autor wskazał na możliwości ograniczania oporów tarcia i zużywania poprzez stosowanie nowoczesnych technologii inżynierii powierzchni, w szczególności powłok na bazie amorficznego węgla. Scharakteryzował podstawowe właściwości powłok węglowych, obejmujące wysoką twardość, korzystne właściwości przeciwzużyciowe oraz możliwość ich zastosowania w warunkach ograniczonego smarowania.

Istotnym zagadnieniem przedstawionym we wprowadzeniu jest oddziaływanie powłok węglowych ze środkami smarowymi, których skład chemiczny i właściwości eksploatacyjne są najczęściej dostosowane do współpracy z konwencjonalnymi materiałami metalicznymi. Autor zwrócił uwagę na możliwość występowania odmiennych mechanizmów kształtowania filmu smarnego w skojarzeniach zawierających powłoki węglowe, co uzasadnia potrzebę ich eksperymentalnej oceny.
Rozdział kończy przedstawienie ogólnej koncepcji badań, obejmujących analizę wpływu powłoki a-C:H:W oraz syntetycznych olejów silnikowych na właściwości tribologiczne skojarzeń o styku konforemnym i niekonforemnym. Wprowadzenie stanowi uzasadnienie podjętej problematyki badawczej i wskazuje jej znaczenie zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne.
Rozdział drugi zawiera przegląd literatury dotyczącej właściwości tribologicznych smarowanych węzłów tarcia, charakterystyki środków smarowych oraz metod technologicznego kształtowania warstw powierzchniowych. W pierwszej części Doktorant przedstawił klasyfikację olejów silnikowych, ich właściwości fizykochemiczne i użytkowe oraz znaczenie dodatków uszlachetniających w ograniczaniu tarcia, zużywania i zacierania elementów maszyn. Szczególną uwagę poświęcił procesom degradacji olejów zachodzącym podczas eksploatacji, obejmującym: zmiany lepkości, zanieczyszczenie produktami zużycia oraz pogorszenie właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych.
Następnie omówił podstawowe rodzaje tarcia oraz charakterystykę skojarzeń ciernych ze stykiem konforemnym i niekonforemnym. Przedstawił również metody modyfikacji warstw powierzchniowych, ze szczególnym uwzględnieniem technologii PVD i CVD oraz możliwości ich zastosowania w elementach maszyn narażonych na intensywne oddziaływania tribologiczne.
Znaczną część rozdziału poświęcono powłokom diamentopodobnym DLC, w tym powłokom amorficznego węgla uwodornionego z dodatkiem wolframu a-C:H:W. Omówiono ich budowę, właściwości mechaniczne, odporność na zużywanie oraz wpływ warunków pracy na zachowanie w skojarzeniach ciernych. Autor przedstawił także przykłady badań dotyczących wykorzystania powłok węglowych w różnych układach mechanicznych, analizując ich wpływ na współczynnik tarcia, zużycie oraz uszkodzenia warstw powierzchniowych.
W podsumowaniu analizy literatury zawarł identyfikację luki badawczej dotyczącej niewystarczającego rozpoznania łącznego wpływu powłok węglowych i degradacji eksploatacyjnej olejów silnikowych na właściwości tribologiczne skojarzeń o zróżnicowanej geometrii styku. Autor wskazał również na ograniczoną liczbę badań, w których oleje po przeprowadzeniu prób tribologicznych poddawano dalszej ocenie właściwości przeciwzatarciowych. Przedstawiona analiza stanowi podstawę sformułowania problemu badawczego oraz opracowania programu badań własnych.
W rozdziale trzecim Autor sformułował cel naukowy i praktyczny rozprawy oraz określił problem badawczy i zakres planowanych badań eksperymentalnych. **Za cel naukowy** przyjęto określenie wpływu powłoki amorficznego węgla a-C:H:W, wytworzonej metodą PVD, oraz rodzaju i stanu eksploatacyjnego syntetycznych olejów silnikowych na przebieg procesów tribologicznych w skojarzeniach ciernych o styku konforemnym i niekonforemnym, pracujących w warunkach ograniczonego smarowania. **Cel praktyczny** ukierunkowano na zwiększenie trwałości eksploatacyjnej węzłów tarcia poprzez zastosowanie powłoki węglowej na jednym z elementów konstrukcyjnych skojarzenia, bez konieczności istotnej ingerencji w jego konstrukcję i wymiary geometryczne. W założeniach uwzględniono zastosowanie zarówno nowych, jak i eksploatowanych olejów silnikowych, co pozwala na przybliżenie warunków występujących podczas rzeczywistej pracy silników spalinowych.

Problem badawczy obejmuje określenie wpływu rodzaju warstwy powierzchniowej oraz właściwości środka smarnego na współczynnik i siłę tarcia, temperaturę w obszarze kontaktu, zużycie liniowe i masowe elementów oraz zmiany parametrów geometrycznych ich powierzchni. Dodatkowym zagadnieniem jest ocena zmian właściwości przeciwzatarciowych olejów następujących wskutek ich eksploatacji w badanych skojarzeniach ciernych.
Autor określił również zakres pracy, obejmujący:

- analizę literatury,
- opracowanie metodyki,
- przygotowanie próbek,
- realizację badań stanowiskowych,
- analizę właściwości olejów oraz ocenę stanu warstw powierzchniowych po testach.
- porównanie skojarzeń z elementami ulepszanymi cieplnie lub utwardzanymi powierzchniowo oraz z powłoką a-C:H:W, smarowanych olejami SAE 5W30 i SAE 5W40.

Rozdział w sposób uporządkowany wyznacza kierunek dalszych badań i określa podstawowe wielkości umożliwiające weryfikację przyjętej koncepcji badawczej.
Rozdział czwarty zawiera charakterystykę obiektów badań, zastosowanych materiałów oraz szczegółowy opis metodyki eksperymentalnej. Autor przyjął dwa modele skojarzeń ciernych, odpowiadające wybranym rozwiązaniom konstrukcyjnym silników spalinowych. Pierwszy model obejmuje styk konforemny, odwzorowujący współpracę czopa wału korbowego z panewką łożyskową, natomiast drugi dotyczy styku niekonforemnego, charakterystycznego dla współpracy krzywki wałka rozrządu z elementem układu zaworowego.
Do badań styku konforemnego wykorzystano próbki pierścieniowe wykonane ze stali 34CrNiMo6, ulepszane cieplnie lub pokryte powłoką a-C:H:W, współpracujące z przeciwpróbkami wykonanymi ze stopu łożyskowego CuPb30. W przypadku styku niekonforemnego zastosowano stalowe próbki pierścieniowe oraz komercyjne płytki regulacji luzu zaworowego, występujące w wariancie utwardzonym powierzchniowo i dodatkowo pokrytym powłoką węglową. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem testera tribologicznego T-05 w układzie rolka–klocek. Program eksperymentalny obejmował próby rozruchowe oraz badania zużycia przy zróżnicowanych obciążeniach. W styku konforemnym stosowano naciski jednostkowe od 5 do 20 MPa, a w styku niekonforemnym siły nacisku od 1200 do 3000 N. Do smarowania wykorzystano nowy i eksploatowany olej silnikowy SAE 5W30 oraz nowy olej SAE 5W40. Metodykę rozszerzono o pomiary parametrów chropowatości i stereometrii powierzchni, obserwacje mikroskopowe oraz badania właściwości przeciwzatarciowych olejów w aparacie czterokulowym w temperaturach 40°C i 100°C. Uwzględniono również test jednokroplowy, umożliwiający wizualną ocenę stanu zanieczyszczenia olejów.
Rozdział piąty stanowi zasadniczą część eksperymentalną rozprawy i zawiera wyniki badań tribologicznych skojarzeń ciernych o styku konforemnym i niekonforemnym oraz ocenę zmian właściwości syntetycznych olejów silnikowych. Materiał badawczy przedstawiono w trzech głównych częściach, obejmujących procesy tarcia i zużywania w obu typach styku oraz charakterystykę środków smarowych po przeprowadzonych testach.
W pierwszej części przedstawiono wyniki badań skojarzeń konforemnych, analizując wpływ rodzaju warstwy powierzchniowej, nacisków jednostkowych oraz środka smarowego na moment rozruchowy, współczynnik tarcia, temperaturę i zużycie współpracujących elementów. Szczególną uwagę poświęcono porównaniu skojarzeń zawierających stalowe próbki pierścieniowe ulepszane cieplnie oraz pokryte powłoką a-C:H. Uzyskane wyniki wskazują na zróżnicowane zachowanie badanych par

ciernych, przy czym zastosowanie powłoki węglowej nie prowadziło do jednoznacznego zmniejszenia oporów tarcia, a w wielu przypadkach powodowało zwiększenie zużycia przeciwpróbek wykonanych ze stopu CuPb30.

W drugiej części rozdziału przedstawiono wyniki badań styku niekonforemnego, obejmujące analizę wpływu powłoki a-C:H na właściwości tribologiczne płytek zaworowych. Wykazano, że zastosowanie powłoki sprzyjało stabilizacji współczynnika tarcia i ograniczeniu zużycia w większości badanych warunków. Przeprowadzono również analizę szerokości śladów zużycia, obserwacje mikroskopowe oraz pomiary chropowatości i topografii powierzchni, pozwalające na uzyskanie charakterystyki procesów niszczenia warstw powierzchniowych.

Trzecia część rozdziału dotyczy oceny stopnia degradacji olejów oraz zmian ich właściwości przeciwzatarciowych po badaniach tribologicznych. Analizowano wpływ rodzaju skojarzenia materiałowego, temperatury i historii eksploatacyjnej oleju na obciążenie zacierające oraz graniczny nacisk zatarcia. Wyniki uzupełniono analizą stanu powierzchni elementów współpracujących. Rozdział przedstawia obszerny materiał eksperymentalny umożliwiający porównawczą ocenę wpływu powłoki węglowej i właściwości środków smarnych na przebieg procesów tribologicznych.

W rozdziale szóstym Autor przeprowadził interpretację wyników badań własnych, koncentrując się na wzajemnych zależnościach pomiędzy rodzajem warstwy powierzchniowej, geometrią styku, warunkami obciążenia oraz stanem eksploatacyjnym oleju silnikowego. W odniesieniu do skojarzeń konforemnych omówił wpływ powłoki a-C:H:W na moment rozruchowy, współczynnik tarcia oraz intensywność zużywania stopu łożyskowego CuPb30. Zwrócił uwagę, że zastosowanie powłoki węglowej nie zawsze prowadziło do poprawy właściwości całego skojarzenia, a w wielu przypadkach wiązało się ze zwiększeniem zużycia materiału przeciwpróbki. Wyniki te wskazują na konieczność uwzględniania wzajemnych oddziaływań materiałów współpracujących, a nie wyłącznie właściwości przeciwzużyciowych samej powłoki.

W przypadku styku niekonforemnego wykazał korzystniejszy wpływ powłoki a-C:H:W na stabilizację współczynnika tarcia i ograniczenie zużywania płytek zaworowych. Interpretację wyników uzupełniono analizą zmian topografii i parametrów stereometrycznych powierzchni, odnosząc je do mechanizmów zużywania ściernego i adhezyjnego, odkształceń plastycznych oraz procesów docierania współpracujących elementów. Uwzględnił również zależność pomiędzy wzrostem obciążenia a temperaturą w obszarze styku. Istotną część rozdziału stanowi analiza wpływu degradacji olejów silnikowych na przebieg procesów tribologicznych oraz ich właściwości przeciwzatarciowych. Autor wykazał, że zużyty olej SAE 5W30 w wielu przypadkach powodował pogorszenie warunków tarcia, jednak charakter tych zmian był uzależniony od konfiguracji materiałowej i geometrii styku. Całość interpretacji prowadzi do wniosku, że skuteczność powłoki a-C:H:W należy rozpatrywać w odniesieniu do całego układu tribologicznego, z uwzględnieniem materiałów współpracujących, środka smarnego i warunków jego eksploatacji.

Rozdział siódmy zawiera syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań oraz wnioski wynikające z analizy wpływu powłoki a-C:H:W i stopnia degradacji olejów silnikowych na właściwości tribologiczne badanych skojarzeń ciernych. Autor uporządkował rezultaty w trzech grupach, obejmujących 11 wniosków poznawczych, 7 wniosków utylitarnych oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

W części poznawczej przedstawiono najważniejsze zależności pomiędzy zastosowaną powłoką węglową, geometrią styku oraz właściwościami smarnymi olejów silnikowych. Wykazano, że zastosowanie powłoki a-C:H:W w skojarzeniach niekonforemnych sprzyja stabilizacji współczynnika

tarcia oraz ograniczeniu zużycia, natomiast w styku konforemnym jej oddziaływanie nie jest jednoznacznie korzystne. Szczególne znaczenie mają wyniki potwierdzające zwiększone zużycie stopu łożyskowego CuPb30 w większości skojarzeń z elementami pokrytymi powłoką węglową. Wskazano również wpływ rodzaju i stanu oleju na moment rozruchowy, temperaturę, odporność na zacieranie oraz zmiany chropowatości powierzchni.

Wnioski utylitarne odnoszą się przede wszystkim do możliwości wykorzystania powłok węglowych w elementach silników spalinowych oraz zasad doboru materiałów i środków smarowych. Autor podkreślił konieczność uwzględniania nie tylko klasy lepkości oleju, lecz także jego stanu eksploatacyjnego i współdziałania z określoną konfiguracją materiałową węzła tarcia. Wskazano potencjalne korzyści wynikające z zastosowania powłoki a-C:H:W w ograniczaniu zużywania i zacierania wybranych skojarzeń.

Doktorant określił również **kierunki dalszych badań**, obejmujące ocenę długotrwałej eksploatacji powłok, analizę wpływu produktów degradacji olejów i dodatków uszlachetniających, rozszerzenie zakresu stosowanych środków smarnych oraz opracowanie modeli prognostycznych trwałości węzłów tarcia. Przedstawione wnioski odzwierciedlają zasadnicze rezultaty badań i wskazują na znaczenie kompleksowego doboru powłoki, materiału przeciwpróbki oraz środka smarnego dla poprawy właściwości eksploatacyjnych układów tribologicznych.

Pod względem formalnym rozprawa została opracowana poprawnie, a treści zawarte w poszczególnych rozdziałach rozmieszczone zostały zgodnie z postawionymi celami. Układ pracy jest prawidłowy i zgodny z zasadami twórczości naukowej. Podjęty w rozprawie temat jest ważny dla nauki w zakresie inżynierii mechanicznej, ze szczególnym uwzględnieniem tribologii, inżynierii powierzchni oraz eksploatacji maszyn. Recenzowana rozprawa posiada logiczną i spójną konstrukcję, typową dla prac naukowych. Praca napisana jest poprawną polszczyzną. Mgr inż. Maciej Daszykowski w dysertacji potwierdza znajomość literatury i problematyki przedmiotu.

Za najważniejsze osiągnięcie naukowe Doktoranta uznaję wykazanie zależności pomiędzy skutecznością zastosowania powłoki a-C:H:W a rodzajem skojarzenia materiałowego, geometrią styku oraz stanem eksploatacyjnym środka smarowego. Szczególnie istotne znaczenie poznawcze mają wyniki potwierdzające zwiększone zużycie stopu łożyskowego CuPb30 podczas współpracy z powłoką węglową, przy jednoczesnym wykazaniu jej korzystnego wpływu na właściwości tribologiczne wybranych skojarzeń niekonforemnych. Uzyskane rezultaty wskazują na konieczność kompleksowego doboru materiałów i środków smarnych oraz stanowią wartościowy wkład w rozwój wiedzy dotyczącej projektowania i eksploatacji smarowanych węzłów tarcia.

Doktorant zaplanował i przeprowadził program badawczy, a postawione w pracy cele zrealizował.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska jest wartościowym opracowaniem naukowym i zawiera wnioski poznawcze, które mają znaczenie aplikacyjne.

UWAGI KRYTYCZNE I PYTANIA

- **W tabeli 2.1 (str. 11)** występuje błędne oznaczenie wskaźnika lepkości jako lepkości wyrażonej w mm^2/s. Wartości od 80 do 120 odnoszą się do bezwymiarowego wskaźnika lepkości VI. Nieprawidłowo przedstawiono również kryteria klasyfikacji olejów bazowych.
- **W tabeli 2.2 (str. 12–13)** zamieszczono nieprawidłowe wartości lepkości wysokotemperaturowej HTHS dla wybranych klas ACEA, w tym A3/B3, C3 i C4. Ponadto zastosowano nieaktualne oznaczenia klas olejów i błędnie zasugerowano, że wyższy numer kategorii ACEA oznacza korzystniejsze właściwości przeciwzatarciowe.

- **Str. 45 oraz 56–59** nie przedstawiono ilościowej charakterystyki stopnia degradacji oleju SAE 5W30 po około 8000 km eksploatacji, obejmującej między innymi zmiany lepkości, liczby kwasowej i zasadowej oraz zawartości produktów zużycia. Ogranicza to możliwość oceny wpływu tytułowego „stopnia zużycia" oleju
- **Na stronach 52–53** Autor deklaruje zastosowanie randomizowanego programu badawczego i wyznaczanie przedziałów ufności. W prezentacji wyników brakuje jednak konsekwentnego przedstawienia odchyleń standardowych, niepewności pomiarowych oraz oceny istotności uzyskanych różnic.
- Podczas kolejnych prób tarciowo - zużyciowych wykorzystywano ten sam pierścień oraz próbkę oleju, co mogło powodować nakładanie się wpływu obciążenia, wcześniejszego zużycia i degradacji środka smarnego. Ponadto wyeliminowano wyniki uzyskane przy obciążeniu 1200 N bez przedstawienia ilościowego kryterium ich odrzucenia **(str. 55–56).**
- Występuje rozbieżność pomiędzy podanymi parametrami narastania obciążenia w aparacie czterokulowym. Przy szybkości 409 N/s i czasie 18 s obciążenie powinno osiągnąć 7362 N, podczas gdy Autor podaje 7200 N (**str. 60**).
- **Str. 92 i 97** – porównanie wyników zużycia wymaga uwzględnienia faktu, że jedna z prób zakończyła się zatarciem po 859 s, podczas gdy nominalny czas badań wynosił 1800 s. Różny czas trwania prób ogranicza bezpośrednią porównywalność otrzymanych wartości zużycia.
- **Str. 92 i 158 tabela 5.7 oraz wniosek poznawczy nr 3** – błędnie określono największą różnicę zużycia liniowego jako 15%. Dla oleju SAE 5W30 zużytego i obciążenia 2400 N zużycie zmniejszyło się z 24,7 do 10,2 µm, co odpowiada redukcji o 58,7%.
- **Str. 158–161** – niektóre wnioski mają charakter zbyt ogólny i nie uwzględniają w pełni przypadków zwiększonego zużycia materiałów współpracujących z powłoką a-C:H:W. Ponadto przeprowadzone badania nie pozwalają na wyznaczenie optymalnego czasu eksploatacji oleju oraz nie potwierdzają jednoznacznie zwiększenia trwałości rzeczywistych elementów silnika.
- W bibliografii i wykazach występują niepełne opisy źródeł, niejednolity zapis pozycji literaturowych oraz błędy redakcyjne. Przykładowo pozycja **84 (str. 171)** nie zawiera autora, ani też pełnego tytułu publikacji.

Uwagi edytorskie:

- Niespójny zapis klasy lepkości oleju w omówieniu i podpisie rys. 2.7 str. 17 („10W40") oraz w wykazie rysunków („5W40") str. 175,
- „stosowanych do smarowania parach ciernych" str. 44,
- „w silnikach spalinowym" str. 45,
- „z stopu łożyskowego CuPb30" (wielokrotnie) str. 45-46,
- „Po przeprowadzonych badaniach wykonano zdjęciach" str. 55,
- „pomiar 5 odcinków pomiarach" str. 59,
- Niejednolity zapis stopu w tabeli 5.2: „CUPb30" str.69,
- W podpisach tabel 5.3–5.5 użyto określenia „siła nacisku" dla wartości wyrażonych w MPa str. 76–79,
- Niezręczne sformułowanie: „lepsze warunki tarcia pracy ciernej" str.97,
- W podpisie rys. 5.18 podano „styk konforemny" mimo odniesienia do płytek zaworowych (układ niekonforemny) str. 109,
- „miedzy klasą lepkościową" str. 159,
- „zmniejszenie oporów tarcia i zużycie" str. 161,
- „płytką zaworową utwardzoną powierzchniową" str. 161,
- W pozycji literatury 59 znajdują się błędy angielskiego tytułu, m.in. „on on", „mico-impact", „fatiguwear" str. 169,
- Niekompletna pozycja bibliograficzna 84: „Monografie Politechniki Lubelskiej, Tribologia, Lublin, 2017" str. 171,
- Nagłówek „WYKAZ ZAŁĄCZNIKÓW" obejmuje wyłącznie wykaz rysunków i wykaz tabel str. 174,
- „Ryunek 5.9 str. 177,

- W wykazie tabel zamieniono nazwy klasyfikacji: tabela 2.1 opisana jako ACEA, a tabela 2.2 jako API str. 178,
- Niespójności zapisu klas lepkości (np. „5W30" i „5W-30"), temperatur („oC", „°C"), jednostek i oznaczeń zmiennych w całej rozprawie,
- W Literaturze niejednolity format opisów bibliograficznych: inicjały, tytuły, roczniki, numery tomów, strony i format czasopism.

Proszę o odniesienie Autora do następujących pytań:

- Jakie właściwości fizykochemiczne powłoki a-C:H:W zdecydowały o jej wyborze do badań i czym różni się ona pod względem tribologicznym od klasycznych powłok a-C:H:W?
- Jakie praktyczne problemy eksploatacyjne silników spalinowych stanowiły bezpośrednią przesłankę podjęcia przedstawionej problematyki badawczej?
- Jakie mechanizmy tribochemiczne mogą decydować o odmiennym zachowaniu powłoki a-C:H:W podczas współpracy z materiałami stalowymi oraz stopami łożyskowymi CuPb30?
- Dlaczego do oceny wpływu stanu eksploatacyjnego oleju wybrano tylko jeden przebieg jego użytkowania, wynoszący około 8000 km?
- W jaki sposób można oddzielić wpływ klasy lepkości SAE 5W30 i SAE 5W40 od wpływu odmiennego składu chemicznego oraz pakietów dodatków uszlachetniających tych olejów?
- Jakie mechanizmy zużywania odpowiadają za tak znaczny wzrost zużycia stopu łożyskowego CuPb30 podczas współpracy z pierścieniem pokrytym powłoką a-C:H:W? Czy rozważano udział zużycia ściernego, adhezyjnego i oddziaływania produktów zużycia jako trzeciego ciała?
- Czy przeprowadzono badania pozwalające stwierdzić, że powłoka a-C:H:W zachowała ciągłość i przyczepność do podłoża po zakończeniu prób, szczególnie przy najwyższych obciążeniach?

WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Daszykowskiego stanowi wartościowe opracowanie naukowe, zawierające oryginalne wyniki badań dotyczących wpływu powłoki a-C:H:W i stanu eksploatacyjnego olejów silnikowych na procesy tarcia i zużywania w wybranych skojarzeniach ciernych. Pomimo przedstawionych uwag krytycznych oceniam, że Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w **dyscyplinie inżynieria mechaniczna** oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.
W mojej ocenie rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami). W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Daszykowskiego i dopuszczenie go do publicznej obrony

Kielce, dn. 15 października 2026 roku

Monika Madej