dr hab. prof. UR Rafał Reizer
Uniwersytet Rzeszowski
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Instytut Inżynierii Materiałowej
Katedra Materiałów Funkcjonalnych
ul. Pigonia 1; 35-310 Rzeszów

Rzeszów 22.09.2026

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"**

Podstawą recenzji jest pismo o numerze RM-530-04-02/2026 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta z dnia 8 lipca 2026 roku.

1. Uzasadnienie wyboru problematyki badawczej

Problematyka ograniczania tarcia i zużycia elementów maszyn pozostaje jednym z istotnych zagadnień współczesnej tribologii. Straty energii wynikające z oporów tarcia oraz postępujące zużycie powierzchni współpracujących elementów wpływają bezpośrednio na sprawność, trwałość i niezawodność obiektów technicznych. Z tego względu poszukuje się rozwiązań materiałowych i technologicznych pozwalających na ograniczenie intensywności procesów zużycia przy jednoczesnym zmniejszeniu współczynnika tarcia, szczególnie w warunkach ograniczonego smarowania.

Jednym z kierunków poprawy właściwości tribologicznych elementów maszyn jest stosowanie niskotarciowych powłok węglowych. Szczególne znaczenie mogą mieć powłoki typu a-C:H, które łączą wysoką twardość i odporność na zużycie z możliwością uzyskania korzystnych właściwości ciernych. Dodatkową zaletą tego rodzaju powłok jest stosunkowo niska temperatura ich osadzania, umożliwiająca modyfikację powierzchni elementów bez istotnego pogorszenia właściwości mechanicznych materiału podłoża.

Samo zastosowanie tego typu powłoki nie gwarantuje jednak uzyskania korzystnych właściwości eksploatacyjnych węzła tarcia. O przebiegu procesów tribologicznych decyduje bowiem cały układ tribologiczny, który obejmuje materiały elementów współpracujących, właściwości ich warstwy powierzchniowej, geometrię styku, obciążenie, prędkość względną oraz rodzaj i właściwości środka smarnego. Szczególnego znaczenia nabiera przy tym współpraca powłok węglowych ze środkami smarnymi. Mechanizmy oddziaływania tych środków z powierzchniami pokrytymi powłokami węglowymi mogą być odmienne niż w przypadku klasycznych skojarzeń, a ich wpływ na tarcie i zużycie nie zawsze jest jednoznacznie korzystny.

Istotnym zagadnieniem pozostaje również określenie efektywności zastosowania powłoki a-C:H w zależności od geometrii kontaktu współpracujących powierzchni. Węzły tarcia o styku konforemnym i niekonforemnym różnią się rozkładem nacisków jednostkowych, warunkami tworzenia filmu smarnego oraz mechanizmami inicjowania i rozwoju zużycia. Powoduje to, że wyniki badań uzyskane dla jednego rodzaju skojarzenia nie mogą być bezpośrednio przenoszone na inne rozwiązania konstrukcyjne. Zasadne jest zatem przeprowadzenie kompleksowej analizy obejmującej różne konfiguracje styku oraz zróżnicowane warunki obciążenia i smarowania.

Problem badawczy podjęty w rozprawie Pana mgr inż. Macieja Daszykowskiego pt.: pt. *„Wpływ powłoki amorficznego węgla a-C:H:W oraz stopnia zużycia syntetycznych olejów silnikowych na właściwości tribologiczne smarowanych węzłów tarcia”* realizowanej pod opieką naukową promotora dr hab. inż. Janusza Lubasa, wynika z potrzeby określenia zależności pomiędzy zastosowaniem technologicznie ukształtowanej powłoki a-C:H:W, rodzajem zastosowanego oleju silnikowego oraz charakterem styku tribologicznego a wartościami oporów tarcia i intensywnością zużycia współpracujących elementów. Rozpoznanie tych zależności pozwoli na ocenę skuteczności powłoki a-C:H:W w warunkach ograniczonego smarowania oraz na określenie warunków, w których jej zastosowanie przynosi największe korzyści eksploatacyjne.

Podjęcie przedstawionego problemu jest uzasadnione zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do lepszego poznania mechanizmów współpracy powłok węglowych ze środkami smarnymi oraz umożliwić bardziej świadomy dobór materiałów, warstw powierzchniowych i olejów do konkretnych węzłów tarcia. W ujęciu praktycznym może to prowadzić do ograniczenia strat energii, zwiększenia trwałości elementów oraz poprawy sprawności i niezawodności układów mechanicznych, w tym węzłów tarcia występujących w silnikach spalinowych.

Na tej podstawie można stwierdzić, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Macieja Daszykowskiego, zarówno pod względem podjętej problematyki, jak i zrealizowanego zakresu badań, wpisuje się w aktualne kierunki badań prowadzonych w naukach technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej wraz z uwagami

Recenzowana rozprawa doktorska pt.: *Wpływ powłoki amorficznego węgla a-C:H:W oraz stopnia zużycia syntetycznych olejów silnikowych na właściwości tribologiczne smarowanych węzłów tarcia* liczy w całości (wraz z załącznikami) 179 stron. Obejmuje to: stronę tytułową (1 strona), podziękowania (1 strona), wykaz ważniejszych oznaczeń (1 strona), spis treści (2 strony), wprowadzenie (3 strony), pięć rozdziałów podzielonych na podrozdziały (149 strony), wnioski (podzielone na poznawcze, utylitarne i rozwojowe – 5 stron), streszczenie w języku polskim i angielskim (2 strony), bibliografię (9 stron) oraz załączniki w postaci wykazu tabeli i rysunków (6 stron).

Wykaz literatury zawiera 124 pozycje, w tym 12 pozycji stanowiących odnośniki do stron internetowych, 4 normy oraz 2 instrukcje obsługi aparatury badawczej. Dobór literatury oceniam pozytywnie pod względem jej aktualności. Wśród cytowanych źródeł znajduje się 17 pozycji opublikowanych w okresie ostatnich dwóch lat (2026-2024 - w tym jedna pozycja współautorska Doktoranta) oraz 24 pozycje z ostatnich pięciu lat, co wskazuje na uwzględnienie w rozprawie bieżącego stanu wiedzy w analizowanym obszarze badawczym.

Struktura rozprawy, obejmująca kolejność rozdziałów i podrozdziałów oraz sposób uporządkowania treści, jest logiczna i przejrzysta. Tekst pracy wzbogacono o 79 rysunków i 30 tabel, stanowiących istotne uzupełnienie prezentowanych treści.

Rozprawę rozpoczyna **Wprowadzenie**, w którym Autor wychodzi od ogólnej charakterystyki zjawisk tarcia i zużycia oraz ich znaczenia w eksploatacji elementów maszyn, a następnie stopniowo zawęża rozważania do zagadnień związanych z kształtowaniem warstw powierzchniowych, stosowaniem powłok przeciwzużyciowych oraz doborem środków smarnych. W końcowej części Autor precyzuje zakres rozprawy, koncentrując badania na ocenie wpływu powłoki węglowej typu a-C:H:W oraz wybranych olejów silnikowych na właściwości tribologiczne węzłów tarcia pracujących w styku konforemnym i niekonforemnym w warunkach ograniczonego smarowania. Podkreśla przy tym znaczenie właściwego doboru warstwy powierzchniowej i środka

smarnego dla ograniczenia zużycia i oporów tarcia, a w konsekwencji zwiększenia trwałości oraz sprawności eksploatacyjnej układów mechanicznych.

Rozdział drugi, zatytułowany „Analiza literaturowa" składa się z pięciu podrozdziałów. Przedstawiono w nim zagadnienia bezpośrednio związane z tematyką rozprawy, w szczególności właściwości i rolę olejów silnikowych w procesach tarcia i zużycia, charakterystykę par ciernych oraz zasady kształtowania warstw powierzchniowych węzłów tribologicznych. Dużą uwagę poświęcono powłokom zawierającym warstwę węgla amorficznego oraz ich właściwościom tribologicznym.

Układ podrozdziałów prowadzi od ogólnej charakterystyki środków smarnych i skojarzeń ciernych do bardziej szczegółowego omówienia powłok węglowych, stanowiących istotny element problematyki badawczej rozprawy.

W podsumowaniu analizy literaturowej Autor wskazuje na istotne znaczenie modyfikacji warstwy powierzchniowej oraz właściwego doboru środków smarnych dla ograniczenia tarcia i zużycia w węzłach tribologicznych. Przeprowadzona analiza pozwoliła zidentyfikować lukę badawczą dotyczącą braku kompleksowych badań obejmujących jednoczesną ocenę powłoki a-C:H:W, olejów o różnym stopniu degradacji oraz różnych rodzajów styku tribologicznego. Wskazane ograniczenia aktualnego stanu wiedzy stanowią uzasadnienie dla przyjętej w rozprawie wieloetapowej metodyki badań, ukierunkowanej na możliwie wierne odwzorowanie rzeczywistych warunków eksploatacji.

W **rozdziale trzecim** Autor przedstawia *cel, problem badawczy* oraz *zakres rozprawy*. Jako cel naukowy pracy Autor definiuje określenie wpływu powłoki a-C:H:W oraz rodzaju i stanu eksploatacyjnego oleju silnikowego na przebieg procesów tarcia i zużycia w skojarzeniach ciernych o styku konforemnym i niekonforemnym, pracujących w warunkach ograniczonego smarowania.

Praktycznym celem pracy jest wg Autora, zwiększenie trwałości tribologicznej istniejących węzłów tarcia poprzez zastosowanie powłoki a-C:H:W, bez konieczności istotnych zmian konstrukcyjnych, z uwzględnieniem warunków zbliżonych do rzeczywistej eksploatacji.

Problem badawczy rozprawy jest konsekwencją wcześniej zdefiniowanych celów i określono go jako potrzebę wyjaśnienia wpływu zastosowania powłoki a-C:H:W oraz rodzaju i stanu eksploatacyjnego oleju silnikowego na przebieg procesów tribologicznych w skojarzeniach ciernych o styku konforemnym i niekonforemnym, pracujących w warunkach ograniczonego smarowania.

Na podstawie przedstawionego problemu badawczego Autor wskazuje trzy podstawowe czynniki wejściowe: obecność powłoki a-C:H:W na elemencie węzła tarcia, rodzaj i stan eksploatacyjny oleju silnikowego oraz rodzaj styku tribologicznego. Czynnikami wynikowymi są natomiast charakterystyki procesu tarcia (siła tarcia, współczynnik tarcia, temperatura w strefie styku), zużycie elementów węzła ciernego (liniowe i masowe), zmiany parametrów chropowatości powierzchni oraz właściwości przeciwzatarciowe środka smarnego.

Rozdział trzeci zamyka charakterystyka zakresu pracy przedstawiająca wypunktowane elementy planu rozprawy obejmujące: analizę literatury przedmiotu, opracowanie metodyki badawczej oraz przeprowadzenie porównawczych badań tribologicznych skojarzeń ciernych o styku konforemnym i niekonforemnym, pracujących w warunkach ograniczonego smarowania. Całość ma uzupełniać analiza uzyskanych wyników, ukierunkowana na określeni możliwości poprawy właściwości tribologicznych badanych skojarzeń ciernych. Sądzę, że przedstawiony zakres pracy jest w pełni uzasadniony w kontekście podjętej tematyki badawczej.

W **rozdziale czwartym** scharakteryzowano obiekty badań, omówiono przyjętą metodykę badawczą oraz przedstawiono wykorzystaną aparaturę.

Zgodnie z przedstawionym opisem, obiekt badań będą stanowić dwa rodzaje skojarzeń tribologicznych pracujących w warunkach ograniczonego smarowania: konforemne (styk rozłożony) oraz niekonforemne (styk liniowy). W pierwszym przypadku parę cierną tworzyć będą stalowe próbki pierścieniowe, bez powłoki i z powłoką a-C:H:W, współpracujące z przeciwpróbkami wykonanymi ze stopu łożyskowego CuPb30. W drugim przypadku zastosowane zostaną stalowe próbki pierścieniowe współpracujące ze stalowymi płytkami zaworowymi występującymi w wariantach bez powłoki i z powłoką a-C:H:W. Badania zostaną przeprowadzone z zastosowaniem trzech środków smarnych: nowego i przepracowanego oleju silnikowego SAE 5W-30 (po przebiegu około 8000 km) oraz nowego oleju SAE 5W-40. Do badań wykorzystany zostanie tester tribologiczny T-05 typu rolka-klocek.

Przewidziano ponadto ocenę właściwości przeciwzatarciowych wymienionych olejów silnikowych. Dotyczy to zarówno próbek olejów wykorzystanych w badaniach tribologicznych, jak i próbek niepoddanych tym badaniom, z zastosowaniem testera T-02U (aparatu czterokulowego). Wśród aparatury pomiarowej przewidzianej do realizacji badań znalazły się również mikroskop Delta Discovery 30, waga analityczna Radwag WAA 40/160/X/1, profilometr Surtronic 3+ oraz mikroskop cyfrowy Keyence VHX-7000.

W dalszej części rozdziału szczegółowo przedstawiono metodykę badawczą przewidzianą do oceny właściwości tribologicznych skojarzeń konforemnych i niekonforemnych, a także do określenia stopnia zanieczyszczenia olejów silnikowych z wykorzystaniem komercyjnego testu jednokroplowego oraz oceny ich właściwości przeciwzatarciowych.

Pierwsza grupa badań wg Autora obejmować będzie ocenę właściwości tribologicznych skojarzenia konforemnego z wykorzystaniem testera T-05. Zakres badań ma obejmować:

- Docieranie par ciernych w ustalonych warunkach obciążenia i prędkości obrotowej.
- Próby rozruchowe – wyznaczenie maksymalnego momentu tarcia przy zmiennych naciskach jednostkowych.
- Próby zużyciowe – pomiar siły tarcia, temperatury oraz zużycia liniowego i masowego.
- Ocenę stanu powierzchni – dokumentację fotograficzną oraz pomiary parametrów chropowatości Ra, Rz, RSm i Rq.

Uwaga recenzenta: *W tym miejscu nasuwa się uwaga dotycząca ewentualnej potrzeby uszczegółowienia metodyki pomiarów chropowatości powierzchni. Wskazane byłoby doprecyzowanie kierunku wykonania pomiaru, sposobu usuwania składowej kształtu, a także rodzaju i parametrów zastosowanej filtracji.*

Druga grupa badań obejmować będzie ocenę właściwości tribologicznych skojarzenia niekonforemnego z wykorzystaniem testera T-05. W myśl przyjętych założeń badawczych przewidziano:

- Docieranie par ciernych w ustalonych warunkach obciążenia i prędkości obrotowej.
- Próby rozruchowe – wyznaczenie maksymalnego momentu tarcia w początkowej fazie ruchu.
- Próby zużyciowe – pomiar siły tarcia i temperatury oraz ocena zużycia w warunkach długotrwałej pracy i postępującej degradacji oleju.
- Ocenę zużycia i stanu powierzchni – pomiar szerokości śladu wytarcia, parametrów chropowatości 2D (Ra, Rz, RSm, Rq) oraz parametrów topografii 3D (Sa, Sz, Sq, Ssk, Sku, Sp, Sv).

Uwaga recenzenta: *Nasuwa się tu kolejna uwaga dotycząca rozbieżności pomiędzy przedstawioną metodyką badawczą a zakresem zaprezentowanych wyników. Autor zapowiedział*

przeprowadzenie pomiarów topografii powierzchni (3D) elementów skojarzeń tribologicznych, jednak w części wynikowej w rozdziale piątym, przedstawił jedynie parametry chropowatości wyznaczone na podstawie pomiarów profilowych (2D). Wyniki pomiarów topografii powierzchni (3D) zamieszczono wyłącznie w odniesieniu do kulek wykorzystywanych w teście czterokulowym, służącym ocenie właściwości przeciwzatarciowych olejów. Wskazane byłoby zatem wyjaśnienie tej rozbieżności.

Kolejna część badań, zgodnie z opisem autora obejmować będzie analizę środka smarnego wykorzystanego we wcześniejszych badaniach eksperymentalnych. Badania te, również zostały podzielone na dwie części. Pierwsza część obejmować będzie wizualną ocenę stanu analizowanych olejów w tzw. teście „jednokroplowym".

W części drugiej, w celu oceny zmian właściwości przeciwzatarciowych olejów silnikowych w wyniku procesów tribologicznych przeprowadzone zostaną badania na aparacie czterokulowym T-02U, porównujące właściwości olejów przed i po testach par ciernych ze stykiem rozłożonym i liniowym. Autor zaplanował następujący przebieg badań:

- **aparatura:** badania na aparacie czterokulowym T-02U w temperaturach 40 i 100°C, przy obciążeniu narastającym od 0N do 7200 N,
- **rejestrowane parametry:** moment tarcia, temperatura pary ciernej, obciążenie węzła tarcia.
- **wyznaczane parametry:** obciążenie zacierające Pt, obciążenie zatarcia P_{OZ} oraz graniczny nacisk zatarcia p_{OZ},
- **procedura:** trzy próby dla każdego wariantu, z dopuszczalną różnicą wyników do 10%.
- **procedura dodatkowa:** zastosowanie alternatywnej metody wyznaczania parametrów zacierania w przypadku nieosiągnięcia momentu tarcia 10 Nm.

Uwaga recenzenta: *W opisie metodyki badań właściwości przeciwzatarciowych olejów silnikowych Autor nie sprecyzował, że badania na aparacie czterokulowym przeprowadzone zostaną z wykorzystaniem dwóch konfiguracji skojarzenia ciernego: pierwszej, obejmującej cztery kulki stalowe z utwardzoną warstwą powierzchniową oraz drugiej, składającej się z trzech takich kulek i jednej kulki pokrytej powłoką a-C:H:W. O fakcie tym, można dowiedzieć się dopiero w rozdziale piątym, przedstawiającym wyniki badań eksperymentalnych. Wskazane zatem byłoby uzupełnienie metodyki o tę informację.*

Rozdział piąty stanowi zasadniczą, najobszerniejszą oraz najważniejszą część rozprawy. To właśnie w tym rozdziale Autor prezentuje własny dorobek badawczy, obejmujący przeprowadzone eksperymenty oraz ich wyniki, zgodnie z metodologią opisaną w rozdziale czwartym.

Badania eksperymentalne przeprowadzone w ramach dysertacji podzielone zostały na trzy etapy. Pierwsza grupa badań obejmowała ocenę właściwości tribologicznych skojarzenia konforemnego, odwzorowującego współpracę wału korbowego z półpanewką łożyskową silnika spalinowego. Badania przeprowadzono na testerze T-05, z wykorzystaniem stalowych próbek pierścieniowych, bez powłoki i z powłoką a-C:H:W, współpracujących z przeciwpróbkami ze stopu CuPb30 w warunkach smarowania trzema olejami silnikowymi: nowy i przepracowany olej silnikowy SAE 5W-30 (po przebiegu około 8000 km) oraz nowy olej SAE 5W-40. Po wstępnym docieraniu par ciernych wykonano próby rozruchowe, mające na celu określenie maksymalnego momentu tarcia przy zmiennych naciskach jednostkowych oraz próby zużyciowe, podczas których rejestrowano siłę tarcia, temperaturę w obszarze styku i zużycie liniowe, a także

wyznaczano ubytek masy przeciwpróbek. Uzupełnieniem badań była ocena stanu powierzchni współpracujących elementów, obejmująca dokumentację fotograficzną oraz pomiary parametrów chropowatości Ra, Rz, RSm i Rq.

W drugim etapie przeprowadzono porównawcze badania tribologiczne węzłów tarcia ze stykiem niekonforemnym w układzie rolka–klocek, stanowiącym model skojarzenia krzywka wałka rozrządu–popychacz silnika spalinowego. Badaniom poddano próbki pierścieniowe ulepszane cieplnie, współpracujące z płytkami zaworowymi utwardzonymi powierzchniowo lub pokrytymi powłoką a-C:H:W. Jako środki smarne zastosowano oleje silnikowe 5W30 (nowy i zużyty) oraz 5W40. Po wstępnym docieraniu przeprowadzono próby rozruchowe, umożliwiające wyznaczenie maksymalnego momentu rozruchowego oraz próby zużyciowe przy ustalonej prędkości obrotowej i różnych obciążeniach. Podczas badań rejestrowano siłę tarcia i temperaturę w obszarze styku oraz wyznaczano sumaryczne zużycie liniowe par ciernych. Po zakończeniu prób przeprowadzono pomiary szerokości śladów zużycia, obserwacje mikroskopowe oraz ocenę zmian struktury geometrycznej powierzchni próbek pierścieniowych i płytek zaworowych na podstawie parametrów chropowatości Ra, Rz, RSm i Rq.

Wyniki uzyskane w obu etapach badań przedstawione zostały w postaci wykresów liniowych, słupkowych oraz tabel prezentujących zestawienie uzyskanych parametrów.

Trzecia część badań związana była z analizą środka smarnego wykorzystanego w eksperymentach.

W pierwszym etapie przeprowadzono ocenę stanu olejów silnikowych metodą testu jednokroplowego, obejmującą próbki olejów po badaniach zużycia. Metoda polegała na wizualnej analizie struktury plamy powstałej po naniesieniu kropli oleju na specjalne pole testowe. Ocenie poddano cztery strefy plamy, umożliwiające określenie stopnia zanieczyszczenia oleju cząstkami stałymi, jego ogólnej kondycji oraz wykrycie potencjalnej obecności wody, płynu chłodniczego i paliwa.

Zastosowana metoda umożliwiła jakościową ocenę kondycji olejów silnikowych oraz identyfikację oznak ich zanieczyszczenia i degradacji po badaniach tribologicznych.

Uwaga recenzenta: *Pewną niekonsekwencją tej części pracy jest to, iż w metodyce badawczej przedstawionej w rozdziale czwartym, Autor wskazał, że ocenie stanu metodą testu jednokroplowego poddano oleje silnikowe zarówno po próbach zużyciowych w testerze T-05, jak i po próbach zatarcia w aparacie czterokulowym T-02U. W treści podrozdziału 5.3.1. Autor napisał jednak: „Do wizualnej oceny stanu degradacji oleju po próbach zużycia wybrano 4 próbki zużytego oleju silnikowego 5W30, który smarowały obszar tarcia w parze ciernej z płytką utwardzaną powierzchniowo i płytką z powłoką węglową, w temperaturze 40 oraz 100˚C". Należy tu zauważyć, że podczas badań zużyciowych w testerze T-05 temperatura w obszarze tarcia wzrastała wraz z czasem trwania próby i nie była utrzymywana na stałym poziomie. Natomiast badania w ustalonych temperaturach 40°C i 100°C realizowano jedynie w aparacie czterokulowym T-02U.*

Jako wyniki testu jednokroplowego przedstawiono zdjęcia obrazujące stan wizualny zanieczyszczeń badanych olejów silnikowych (5W30 zużyty, 5W30 nowy oraz 5W40) po próbach zużycia.

Uwaga recenzenta: *W mojej opinii prezentowane wyniki są dosyć chaotyczne, a dodatkowo w opisie nad zdjęciami powtarza się konfiguracja 5W30 zużyty + C, 3000 N. Prawdopodobnie jedna z kombinacji dotyczy obciążenia 2400 N. Może bardziej czytelnym byłoby uszeregować rysunki wg jakiejś logicznej kolejności i dodatkowo opisać każdą z fotografii za pomocą liter a, b, c, … itd.*

Kolejnym etapem trzeciej części badań było porównanie właściwości przeciwzatarciowych olejów wykorzystanych we wcześniejszych eksperymentach.

W tym celu przeprowadzono badania na aparacie czterokulowym T-02U. Porównano oleje pochodzące z testów zużyciowych w testerze T-05 prowadzonych w skojarzeniach o styku konforemnym i niekonforemnym oraz, dla porównania, oleje tego samego typu nie wykorzystane we wcześniejszych eksperymentach. Badania wykonano dla dwóch skojarzeń ciernych: czterech kulek stalowych oraz trzech kulek stalowych i jednej pokrytej powłoką a-C:H:W. Na podstawie pomiarów momentu tarcia przy narastającym obciążeniu wyznaczono obciążenie zacierające P_{oz} oraz graniczny nacisk zatarcia p_{oz} w temperaturach 40 i 100°C.

W dalszej części rozdziału przedstawiono analizę stanu warstwy wierzchniej kulek po badaniach w aparacie czterokulowym. W pierwszym etapie przeprowadzono obserwacje mikroskopowe powierzchni kulek stalowych oraz kulek pokrytych powłoką a-C:H:W, pracujących w skojarzeniach ciernych w temperaturach 40 i 100°C. Następnie, dla tych samych grup próbek, wykonano pomiary topografii powierzchni (3D), w ramach których wyznaczono parametry wysokościowe Sa, Sz, Sq, Ssk, Sku, Sp i Sv.

Uwaga recenzenta: *W tej części rozprawy pewne zastrzeżenia budzą tytuły podrozdziałów 5.3.4 „Ocena warstw powierzchniowych skojarzeń ciernych po eksploatacji w styku konforemnym" oraz 5.3.5 „Ocena warstw powierzchniowych skojarzeń ciernych po eksploatacji w styku niekonforemnym". Sugerują one, że przedmiotem analizy są warstwy wierzchnie próbek poddanych wcześniejszym badaniom zużyciowym w styku konforemnym i niekonforemnym na testerze T-05. W rzeczywistości przedstawione wyniki dotyczą oceny stanu warstwy wierzchniej kulek wykorzystanych w testach czterokulowych na testerze T-02U, w których to zastosowano oleje pochodzące z wcześniejszych badań zużyciowych. Wskazane byłoby zatem doprecyzowanie tytułów obu podrozdziałów, tak aby jednoznacznie identyfikowały przedmiot przeprowadzonych analiz i eliminowały możliwość błędnej interpretacji zakresu badań.*

Podobne zastrzeżenia budzą podpisy tabel 5.16–5.19, zawierających fotografie mikroskopowe powierzchni kulek po badaniach w aparacie czterokulowym T-02U. We wszystkich przypadkach zastosowano tytuł „Zestawienie skojarzeń próbki pierścieniowej w T-05 i kulki w T-02", który może sugerować, że przedstawione obrazy dokumentują stan powierzchni elementów współpracujących bezpośrednio w tych skojarzeniach. W rzeczywistości fotografie dotyczą powierzchni kulek po testach właściwości przeciwzatarciowych olejów, które wcześniej wykorzystywano w badaniach zużyciowych prowadzonych na testerze T-05.

Analogiczne zastrzeżenia dotyczą sposobu opisu wyników pomiarów stereometrii powierzchni kulek przedstawionych w tabelach 5.20 i 5.21. Zastosowane podpisy nie identyfikują jednoznacznie przedmiotu badań, mogąc sugerować, że analizie poddano powierzchnie elementów współpracujących w skojarzeniach ciernych badanych na testerze T-05, podczas gdy w rzeczywistości wyniki dotyczą kulek wykorzystanych w testach czterokulowych z zastosowaniem olejów pochodzących z wcześniejszych badań zużyciowych.
Dodatkową wątpliwość budzi niekonsekwencja w zakresie przeprowadzonych analiz. Pomiary stereometrii powierzchni kulek przedstawiono bowiem wyłącznie dla testów z wykorzystaniem olejów pochodzących z badań skojarzeń o styku niekonforemnym, pomijając analogiczną analizę dla olejów eksploatowanych w skojarzeniach o styku konforemnym.

Rozdział szósty stanowi kontynuację rozważań podjętych w rozdziale piątym i koncentruje się na interpretacji uzyskanych wyników pomiarów przez Autora.

Analiza wyników badań tribologicznych par ciernych ze stykiem konforemnym wykazała istotny wpływ rodzaju warstwy powierzchniowej, właściwości oleju silnikowego oraz nacisku jednostkowego na przebieg procesów tarcia i zużycia. Zastosowanie powłoki a-C:H:W powodowało zwiększenie momentu rozruchowego i początkowych wartości współczynnika tarcia w porównaniu ze skojarzeniami z próbkami ulepszanymi cieplnie. W trakcie prób obserwowano jednak tendencję do stabilizacji lub zmniejszania oporów tarcia w skojarzeniach z powłoką węglową. Olej 5W40 sprzyjał ograniczeniu momentu rozruchowego w porównaniu z olejem 5W30. Pomimo większej odporności skojarzeń z powłoką a-C:H:W na zacieranie, jej zastosowanie prowadziło na ogół do znacznego zwiększenia zużycia liniowego i masowego przeciwpróbek ze stopu łożyskowego CuPb30. Analiza zmian struktury geometrycznej powierzchni wykazała, że przy naciskach 10–15 MPa dominowały procesy wygładzania powierzchni próbek pierścieniowych, natomiast przy nacisku 20 MPa obserwowano intensywniejsze zmiany topografii, szczególnie w skojarzeniach z powłoką a-C:H:W smarowanych olejem 5W40.

W ocenie Autora, uzyskane wyniki wykazały, że zastosowanie powłoki a-C:H:W, pomimo zwiększenia odporności na zacieranie, nie zapewnia jednoczesnego ograniczenia oporów tarcia i zużycia współpracującego elementu.

Analiza wyników badań tribologicznych par ciernych ze stykiem niekonforemnym wykazała istotny wpływ siły nacisku, rodzaju i stanu oleju silnikowego oraz zastosowanej warstwy powierzchniowej na przebieg procesów tarcia i zużycia. Wzrost obciążenia powodował zwiększenie momentu rozruchowego, zużycia liniowego i temperatury w obszarze styku, przy czym nie stwierdzono jednoznacznego wpływu powłoki a-C:H:W na ograniczenie momentu rozruchowego w całym zakresie warunków badawczych. Zastosowanie powłoki węglowej sprzyjało natomiast stabilizacji oporów tarcia i w większości analizowanych przypadków ograniczało zużycie liniowe par ciernych. Przy najwyższym obciążeniu (3000 N) zaobserwowano zatarcie skojarzenia z płytką utwardzoną powierzchniowo, smarowanego nowym olejem 5W30, podczas gdy analogiczne skojarzenie z powłoką a-C:H:W nie uległo zatarciu. Obserwacje mikroskopowe potwierdziły mniejszą intensywność uszkodzeń płytek z powłoką węglową, charakteryzujących się węższymi śladami zużycia i mniejszą liczbą rys w porównaniu z płytkami utwardzonymi powierzchniowo. Pomiary chropowatości wykazały ponadto, że charakter i intensywność zmian struktury geometrycznej powierzchni zależały od rodzaju warstwy powierzchniowej, stanu oleju oraz obciążenia. W określonych warunkach powłoka a-C:H:W ograniczała zmiany parametrów chropowatości współpracujących elementów, jednak efekt ten nie występował we wszystkich badanych skojarzeniach.

Zdaniem Autora, uzyskane wyniki wykazały, że zastosowanie powłoki a-C:H:W w styku niekonforemnym sprzyja zwiększeniu odporności na zacieranie i ograniczeniu zużycia, szczególnie w warunkach wysokich obciążeń. Korzyści tribologiczne zależą jednak od właściwości środka smarującego i warunków pracy, a zastosowanie powłoki nie gwarantuje jednoczesnego zmniejszenia wszystkich analizowanych parametrów tarcia i zużycia.

Badania stanu olejów silnikowych przeprowadzone metodą testu jednokroplowego wykazały istotne różnice w kondycji olejów nowych i eksploatowanego oleju 5W30. Oleje nowe 5W30 i 5W40 po badaniach tribologicznych nie wykazywały obecności zanieczyszczeń ani cieczy obcych, natomiast olej 5W30 po przebiegu 8000 km charakteryzował się wyraźnym pogorszeniem kondycji oraz obecnością zanieczyszczeń mechanicznych. W oleju eksploatowanym nie stwierdzono obecności paliwa ani płynu chłodniczego, a zawartość wody była minimalna. Zastosowanie powłoki a-C:H:W wiązało się z nieco mniejszą ilością zanieczyszczeń mechanicznych w porównaniu ze skojarzeniami z płytkami utwardzonymi powierzchniowo, jednak przy wyższych obciążeniach obserwowano również ciemniejsze zabarwienie oleju, wskazujące na możliwe pogorszenie jego kondycji.

W ocenie Autora, uzyskane wyniki potwierdziły degradację oleju silnikowego podczas eksploatacji oraz wskazały na wpływ rodzaju warstwy powierzchniowej i warunków obciążenia na jego stan po badaniach tribologicznych.

Analiza wyników badań przeciwzatarciowych przeprowadzonych w aparacie czterokulowym wykazała istotny wpływ rodzaju warstwy powierzchniowej kulek, stanu oleju silnikowego oraz temperatury na odporność skojarzeń ciernych na zacieranie. Zastosowanie powłoki a-C:H:W prowadziło do znacznego wzrostu obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego nacisku zatarcia p_{oz} w porównaniu ze skojarzeniami z kulkami stalowymi z utwardzoną warstwą powierzchniową. Korzystny wpływ powłoki obserwowano zarówno w przypadku olejów nowych, jak i eksploatowanego oleju 5W30, również w podwyższonej temperaturze 100°C. Wzrost temperatury powodował na ogół pogorszenie parametrów przeciwzatarciowych, jednak skojarzenia z powłoką węglową zachowywały większą odporność na zacieranie. Analiza mikroskopowa i pomiary stereometrii śladów zużycia wykazały ponadto istotny wpływ wcześniejszych warunków eksploatacji oleju na strukturę geometryczną powierzchni oraz charakter procesów zużycia. W wielu przypadkach oleje pochodzące ze skojarzeń z powłoką a-C:H:W powodowały wzrost parametrów amplitudowych topografii śladów zużycia, pomimo korzystniejszych właściwości przeciwzatarciowych układów z powłoką. W podwyższonej temperaturze obserwowano również nasilenie zjawisk adhezyjnych i deformacji plastycznych.

Z analiza przedstawiona przez Autora wskazuje, że zastosowanie powłoki a-C:H:W istotnie zwiększa odporność skojarzeń czterokulowych na zacieranie, niezależnie od rodzaju i stanu eksploatacyjnego badanego oleju.

Rozdział siódmy rozprawy zawierał wnioski Autora, podzielone na wnioski poznawcze, utylitarne oraz rozwojowe.

W ramach wniosków poznawczych Autor wskazuje, że przeprowadzone badania wykazały, iż właściwości tribologiczne węzłów tarcia z powłoką a-C:H:W zależą od geometrii styku, obciążenia, temperatury oraz rodzaju i stanu eksploatacyjnego oleju silnikowego. Zastosowanie powłoki węglowej sprzyjało zwiększeniu odporności na zacieranie, stabilizacji oporów tarcia i ograniczeniu zużycia w styku niekonforemnym, natomiast w styku konforemnym prowadziło na ogół do zwiększenia zużycia współpracującego elementu ze stopu CuPb30. Wykazano również, że degradacja oleju zazwyczaj pogarsza właściwości tribologiczne skojarzeń, choć jej wpływ zależy od warunków pracy. Analiza zmian topografii i obserwacje mikroskopowe potwierdziły złożony charakter mechanizmów zużycia oraz istotną rolę powłoki a-C:H:W w ograniczaniu lokalnych uszkodzeń powierzchni.

W ramach wniosków utylitarnych Autor stwierdza, że wyniki badań wskazują na możliwość wykorzystania powłok a-C:H:W do zwiększenia odporności na zacieranie i trwałości wybranych węzłów tarcia silników spalinowych, pod warunkiem odpowiedniego doboru materiałów współpracujących, środka smarnego oraz warunków obciążenia. Szczególne znaczenie praktyczne ma uwzględnienie nie tylko klasy lepkości oleju, lecz również jego stanu eksploatacyjnego i okresu użytkowania. Uzyskane rezultaty mogą stanowić podstawę do optymalizacji konstrukcji węzłów tarcia, ukierunkowanej na ograniczenie zużycia oraz zwiększenie ich trwałości i niezawodności.

Natomiast w ramach wniosków rozwojowych Autor wskazuje na potrzebę kontynuowania badań nad powłokami a-C:H:W w warunkach zbliżonych do rzeczywistej eksploatacji silników spalinowych, z uwzględnieniem zmiennych obciążeń, temperatur, prędkości ślizgania i ograniczonego smarowania. Dalsze prace powinny obejmować analizę procesów degradacji olejów i ich oddziaływania z powłokami węglowymi, badania innych środków smarnych oraz szczegółową diagnostykę zmian struktury i składu chemicznego warstw powierzchniowych.

Istotnym kierunkiem rozwoju jest również opracowanie modeli prognostycznych trwałości węzłów tarcia, umożliwiających optymalizację ich konstrukcji i warunków eksploatacji.

Ostatnią część pracy (poza streszczeniem w języku polskim, angielskim oraz załącznikami) stanowi **spis literatury** wykorzystanej w pracy.

Uwaga recenzenta: *Pewne zastrzeżenia budzi brak konsekwencji w sposobie sporządzenia wykazu literatury, w którym poszczególne pozycje bibliograficzne nie zostały zapisane według jednolitego schematu. W przypadku części pozycji podano numer tomu czasopisma i rok publikacji, podczas gdy w innych ograniczono się jedynie do podania roku publikacji czasopisma. Uchybienie to ma jednak charakter redakcyjny i nie wpływa na merytoryczną wartość rozprawy*.

3. Ocena pracy, dodatkowe uwagi i pytania

Pomimo przedstawionych uwag i zastrzeżeń, moja ogólna ocena rozprawy jest pozytywna. Należy podkreślić znaczny zakres przeprowadzonych badań eksperymentalnych, których realizacja wymagała od Doktoranta dużego nakładu pracy, odpowiedniego przygotowania merytorycznego oraz umiejętności posługiwania się zróżnicowanymi metodami badawczymi. Na szczególne podkreślenie zasługuje kompleksowe podejście do analizowanej problematyki, obejmujące zarówno ocenę właściwości tribologicznych badanych skojarzeń ciernych, jak i analizę właściwości przeciwzatarciowych olejów oraz zmian stanu warstwy wierzchniej współpracujących elementów.

Przedstawiony materiał badawczy stanowi wartościowe źródło informacji na temat wpływu zastosowania powłoki a-C:H:W oraz rodzaju i stanu oleju silnikowego na właściwości tribologiczne analizowanych skojarzeń ciernych. Uzyskane wyniki mają znaczenie zarówno poznawcze, jak i potencjalnie aplikacyjne, a ich analiza świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych przez Doktoranta.

Sformułowane w recenzji uwagi dotyczą przede wszystkim potrzeby doprecyzowania niektórych elementów metodyki i sposobu prezentacji wyników oraz uzasadnienia przyjętego zakresu analiz.

Oprócz uwag wspomnianych w poprzedniej części recenzji, chciałbym wskazać kilka uwag dodatkowych oraz pytań:

- Podczas analizy parametrów chropowatości powierzchni Autor powołuje się na normę ISO 4287, natomiast w wykazie ważniejszych oznaczeń definiuje parametr Rz jako „największą wysokość chropowatości według 10 najwyższych profili". Definicja ta jest nieprawidłowa i odpowiada starszej wersji normy z 1984 roku. Zgodnie z bardziej aktualną normą ISO 4287 z roku 1999, parametr Rz, określany jako największa wysokość profilu chropowatości na odcinku elementarnym. Natomiast warto wiedzieć, że obecnie stosowana norma to ISO 21920-2:2021.
- Jakie metody i kryteria statystyczne wykorzystano do oceny wiarygodności wyników uzyskiwanych w kolejnych etapach eksperymentu oraz które decyzje dotyczące zakończenia, modyfikacji lub kontynuacji programu badawczego zostały podjęte na podstawie tych analiz?
- Jakie były warunki oraz metodologia pomiaru stereometrii powierzchni kulek wykorzystywanych w testach czterokulowych?
- W pracy występują drobne usterki natury edytorsko – redakcyjnej, np. str. 12-13, brak wyjaśnienia skrótów *HPHS, SAPS, DPF, TWC, EGR*; opisy części rysunków wykonane są bardzo małą czcionką co utrudnia ich odczyt (szczególnie wartości parametrów na rysunkach w tabeli 5.20 i 5.21); występuje sporo literówek np. str. 35 *na próbek* zamiast *na*

próbce, str. 44 *smarowania parach ciernych* zamiast *smarowania w parach ciernych*, str. 49 *średnice nominalne* zamiast *średnicy nominalnej*, str. 51 *Suftronic 3+* zamiast *Surtronic 3+*, str. 137 *SSk* zamiast *Ssk*, itd.

4. Wniosek końcowy

Rozprawę doktorską Pana mgr inż. Macieja Daszykowskiego oceniam jednoznacznie pozytywnie. Przedłożona rozprawa doktorska stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Przedstawione w niej wyniki badań są oryginalnym osiągnięciem naukowym Doktoranta i potwierdzają jego dobre przygotowanie merytoryczne, znajomość aktualnego stanu wiedzy oraz umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych, a także właściwej analizy i interpretacji uzyskanych rezultatów. Na podkreślenie zasługuje zarówno wartość poznawcza przeprowadzonych badań, jak i potencjał praktycznego wykorzystania ich wyników. Uwzględniając przedstawione osiągnięcia oraz poziom naukowy rozprawy, stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w obowiązujących przepisach prawa.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana 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”* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do publicznej obrony przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej.