

Prof. dr hab. inż. Stefan Żmudzki
Akademia Morska w Szczecinie
Wydział Mechaniczny

Szczecin, 07.01.2020 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Emila Wróblewskiego

nt. „ Wpływ mikrogeometrii powierzchni bocznej tłoka na sprawność mechaniczną silnika spalinowego”

1.Charakterystyka tematu rozprawy pod kątem rozwoju nauki

Wykorzystanie silników spalinowych do realizacji napędu różnego rodzaju obiektów technicznych wymaga ciągłego ich doskonalenia pod kątem zwiększenia sprawności oraz niezawodności. Jedną z dróg prowadzących do uzyskania tych celów jest poznanie mechanizmu funkcjonowania zespołu tłok - cylinder oraz opanowanie projektowania procesów wprowadzających uzyskane wyniki do praktyki.

Temat podjętego przez doktoranta zadania badawczego dokładnie koreluje z przedstawionymi ogólnie zadaniami doskonalenia konstrukcji silników spalinowych.

2. Charakterystyka tematu rozprawy pod kątem redakcyjnym i merytorycznym

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z dziesięciu rozdziałów, podsumowania, wskazania dalszego kierunku badań oraz wykazu literatury. Rozdziały są usystematyzowane w logicznej kolejności i podzielone

na podrozdziały, co pozwala na racjonalne śledzenie całokształtu prezentowanych informacji.

Rozdział pierwszy pt. Wstęp: zawiera syntetyczny opis problematyki związanej z określeniem znaczenia jakości funkcjonowania mechanizmu korbowego dla efektywności pracy silnika spalinowego. W szczególności, zwrócono szczególną uwagę na straty energii tarcia w poszczególnych węzłach ciernych tego mechanizmu, w tym - parze kinematycznej tłok-cylinder.

Rozdział drugi zawiera, oparte na przeglądzie najnowszej literatury, omówienie właściwości konstrukcyjnych: zespołu tłok-cylinder, pierścieni tłoka (uszczelniających i zgarniających), budowy płaszcza tłoka oraz przebiegu współpracy tłoka z cylindrem uwzględniającej : złożony ruch tłoka, ruch pierścieni w rowkach tłoka, zmianę ciśnienia w filmie olejowym i zmianę temperatury elementów. Rozpoznanie właściwości tych zjawisk pozwala na podjęcie określonych działań, które powinny doprowadzić do ograniczenia intensywności zużycia elementów roboczych, poprawy efektywności ich pracy oraz zmniejszenia strat energii.

Rozdział trzeci obejmuje problematykę zużycia elementów pary ciekiej tłok- tuleja cylindrowa, która uwzględnia zjawiska: utleniania, zużycia adhezyjnego i ścierania. Doktorant utrzymuje, że drogą do opanowania tych procesów jest uzyskanie warunków prowadzących do wystąpienia w tych parach ciernych tarcia płynnego. Podaje przykłady wprowadzonych różnych rozwiązań konstrukcyjnych, pozwalających na stopniowe opanowanie tego problemu. Przykładowo, do tego celu służą następujące rozwiązania techniczne: mimośrodowość mechanizmu korbowego, stalowe wkładki podpierścieniowe w tłoku, tłoki składane, pokrywanie powierzchni roboczych specjalnymi materiałami, konstrukcje kompozytowe.

W rozdziale czwartym przedstawiono opis stosowanych technologii tłoków pod kątem zmniejszenia strat energii na tarcie. W tłokach ze stopów aluminium wprowadzono lokalne przetapianie i szybkie chłodzenie wybranych konturów denka tłoka lub tłoczone denko tłoka ze stali stopowej. Działania te pozwoliły na przejście przez tłoki zwiększonych obciążeń cieplnych i mechanicznych. Ponadto, wprowadzono nanoszenie powłok o korzystnych właściwościach trybologicznych na powierzchni nośnej płaszcza tłoka, do których w szczególności należą powłoki Eco Tough New Generation i Eco Tough-D. Powłoki te znacznie zmniejszają zużycie powierzchni par trących oraz zużycie energii.

W rozdziale piątym przedstawiono cele pracy do których należą: określenie wpływu kształtu mikrogeometrii powierzchni bocznej tłoka na tworzenie filmu olejowego oraz wyznaczenie wielkości strat tarcia i zużycia powierzchni współpracujących. Sformułowano następującą tezę pracy: „istnieje możliwość doboru takiego kształtu mikrogeometrii powierzchni nośnej tłoka, który w warunkach przeciętnych obciążeń mechanicznych i cieplnych zapewni ciągłość filmu olejowego oraz zmniejszenie strat tarcia”.

W rozdziale szóstym przedstawiono przyjęty sposób rozwiązania problemu badawczego, który obejmuje symulację numeryczną, w oparciu o program komputerowy „Kolben” oraz badania na stanowisku eksperymentalnym.

Rozdział siódmy dotyczy zaprogramowania i wykonania badań symulacyjnych postawionego problemu badawczego. W tym celu, doktorant kierując się nabytą wiedzą opracował własne wersje mikrogeometrii powierzchni bocznej płaszcza tłoka w postaci schodkowej szczeliny przyjmującej obraz litery H. Do badań symulacyjnych zaprojektował sześć wersji kształtu wzorcowego, różniące się wymiarami półki litery H oraz jej usytuowaniem na wysokości tworzącej po-

wierzchni nośnej płaszczka tłoka. Wyniki badań symulacyjnych dla wybranych sześciu własnych wersji mikrogeometrii oraz kształtu referencyjnego przedstawiono w postaci wykresów ilustrujących siłę tarcia, grubość filmu olejowego, warstwę i pokrycie powierzchni nośnej olejem w funkcji kąta obrotu wału korbowego od 0° do 720° OWK, przy zmiennej temperaturze oleju smarującego, prędkości obrotowej silnika i odnawialnej warstwie oleju. Otrzymane wyniki badań symulacyjnych wskazują, że zaproponowane rozwiązanie techniczne zapewnia realne możliwości poprawy warunków pracy i rezultatów końcowych dla optymalnego rozwiązania mikrogeometrii kształtu powierzchni bocznej płaszczka tłoka.

Rozdział ósmy zawiera opis działań technicznych doktoranta związanych z zaprojektowaniem kształtu sześciu wariantowych rozwiązań kształtu schodkowego powierzchni nośnej płaszczka tłoka odpowiadającej obrazowi litery H. Uzyskanie odpowiedniego wariantu schodkowego kształtu powierzchni nośnej płaszczka tłoka polegało na naniesieniu na powierzchni nośnej tłoka oryginalnego warstwy grafitu grubości $20\mu\text{m}$ metodą sitodruku.

W celu zapewnienia jednakowych warunków poszczególnych pomiarów, przeprowadzono drobiazgową weryfikację kształtu oraz chropowatości powierzchni nośnej wybranych do badań tłoków oryginalnych. Pomiarów kształtu powierzchni nośnej tłoków wykonano w maszynie współrzędnościowej po zdefiniowaniu odpowiedniego dla tłoka układu współrzędnych prostokątnych. Podobnie, doktorant opracował oryginalną metodę pomiaru chropowatości tłoków, przy wykorzystaniu profilometru Perthometer S8P firmy Mahr Perthen.

W ten sposób, poczynione przygotowania materiału badawczego pozwoliły doktorantowi na przeprowadzenie zaplanowanych badań stanowiskowych z odpowiednią dokładnością.

Rozdział dziewiąty obejmuje opis założeń oraz budowy stanowiska badawczego, przeznaczonego do praktycznej weryfikacji właściwości pracy wybranych przypadków mikrogeometrii powierzchni bocznej płaszcza tłoka. Stanowisko eksperymentalne zostało oparte na konstrukcji silnika spalinowego Fiat 170A.046 z odłączeniem mechanizmu rozrządu zaworowego, instalacji smarowania, chłodzenia i zasilania paliwem. W stanowisku zastosowano własny system smarowania i chłodzenia oraz zewnętrzny napęd elektryczny mechanizmu korbowego. Zasadniczym parametrem mierzalnym, służącym do oceny właściwości pracy wybranych przypadków mikrogeometrii powierzchni bocznej płaszcza tłoka wybrano moment obrotowy mierzony na sprzęgle łączącym napędowy silnik elektryczny z wałem korbowym silnika badawczego. Do pomiaru tego momentu wykorzystano momentomierz HBM Drehmomentmesswelle T5.

Cały układ pomiarowy został w pełni zautomatyzowany celem ograniczenia błędów zapisu wyników pomiaru, a obróbkę sygnałów zrealizowano za pomocą oprogramowania HBM CATMAN 3.0, umożliwiającego sterowanie pracą urządzenia SPIDER za pomocą komputera PC.

Uwzględniając wagę zadania, stanowisko wyposażono w oryginalny układ regulacji temperatury oleju smarującego, charakteryzujący się uchybem nie przekraczającym wartości $0,2^{\circ}\text{C}$ w zakresie temperatury 50 do 110°C .

Rozdział dziesiąty zawiera wyniki pomiarów otrzymane w czasie badań na stanowisku eksperymentalnym (opisanym w rozdziale 9) wybranych konstrukcji tłoków z wyspecyfikowaną w rozdziale 8 mikrostrukturą powierzchni nośnej płaszcza tłoka oraz konstrukcji tłoka referencyjnego.

Jako podstawowy wskaźnik jakości działania poszczególnych konstrukcji tłoków został wybrany moment obrotowy mierzony na sprzęgle łączącym elektryczny silnik napędowy z silnikiem badawczym.

Należy przy tym przyznać, że mierzony wówczas moment obrotowy uwzględnia :

- straty energii tarcia płaszcza tłoka o gładź tulei cylindrowej,
- straty energii tarcia w łożyskach par kinematycznych mechanizmu korbowego,
- straty energii tarcia stosu pierścieni tłoka o gładź tulei cylindrowej.

Jednakże, w badaniach porównawczych realizowanych z dużą starannością, dwie z tych strat nie ulegają istotnym zmianom, co pozwala wykorzystać tę informację do wykonania przyjętego zadania badawczego.

Z bogatej prezentacji wyników badań stanowiskowych można wnioskować, że zastosowanie schodkowego profilu powierzchni bocznej płaszcza tłoka spowodowało wyraźne zmniejszenie strat energii tarcia, w szczególności przy prędkościach obrotowych silnika powyżej 2000 obr/min.

W podsumowaniu doktorant stwierdził, że przyjęta metodyka realizacji zadania badawczego okazała się skuteczna, gdyż przebadany problem w warunkach symulacji komputerowej znalazł odpowiednie odzwierciedlenie w przeprowadzonych badaniach stanowiskowych, co potwierdziło słuszność założeń zadania badawczego.

Jako kierunek dalszych badań doktorant zaproponował weryfikację wyników na pracującym silniku spalinowym, badania innych wersji schodkowej mikrogeometrii części nośnej płaszcza tłoka i doskonalenia modelu obliczeniowego tarcia z uwzględnieniem lokalnych odkształceń sprężystych tłoka i cylindra.

Wykaz literatury zawiera 57 pozycji literaturowych odnoszących się do aktualnego stanu wiedzy powszechnej, związanej z prezentowaną problematyką badań warunków pracy mechanizmu korbowego silników spalinowych, a w szczególności współpracy zespołu tłoka z cylindrem.

3. Ocena umiejętności sformułowania i rozwiązania problemu naukowego

Doktorant sformułował problem badawczy w oparciu o szeroko zakrojoną analizę wielu aspektów współpracy tłoka z cylindrem. Stąd zawarte w rozdziale piątym cele i teza pracy są zrozumiałe i trafnie sformułowane, a z praktycznego punktu widzenia atrakcyjne na tyle, aby można było im poświęcić odpowiednią uwagę.

W rozwiązaniu tych zadań doktorant przyjął następującą metodykę postępowania:

- rozwinął metodę symulacji komputerowej warunków współpracy płaszczka tłoka o schodkowym kształcie powierzchni nośnej z cylindrem,
- przeprowadził cykl obliczeń dla proponowanych kształtów schodkowej powierzchni nośnej płaszczka tłoka (odwzorowującej obraz litery H) , pozwalających na wybór rozwiązań do badań stanowiskowych,
- zbudował stanowisko eksperymentalne umożliwiające praktyczną weryfikację wyników badań symulacyjnych wytypowanych rozwiązań konstrukcyjnych- schodkowej powierzchni nośnej płaszczka tłoka,
- przeprowadził badania stanowiskowe, pozwalające na porównawczą ocenę pracy poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych- schodkowej powierzchni nośnej płaszczka tłoka, która potwierdziła słuszność przyjętej tezy rozprawy.

Rozprawa doktorska została napisana w sposób przejrzysty i zrozumiałe. Zostały zawarte w niej istotne dla rozpatrywanego problemu informacje szczegółowe.

4. Istotne uwagi szczegółowe

W manuskrypcie rozprawy znalazły się jednak pewne niedopracowania o charakterze redakcyjnym, stwarzające niekiedy trudności w zrozumieniu myśli autora, lecz nie umniejszające jego osiągnięć naukowych.

Należą do nich:

Nieprecyzyjne sformułowania myśli , które odnoszą się do zdań:

Str.10 zdanie, 6 wiersz od góry: należy uzupełnić o sformułowanie „i gładzi cylindra”,

Str.20 zdanie, 10 wiersz od dołu: nie podano do czego odnoszą się cytowane straty energii.

Str.26 w tytule podrozdziału należy podać : tłoka ze stopu aluminium.

Str.28 zdanie, 3 wiersz od góry jest niejasne, a zdanie następne jest niedokończone.

Str.36 zdanie, 14 wiersz od dołu: obciążenie silnika , czyli jego moc, nie może stanowić zestawu parametrów termodynamicznych.

Str.69 zdanie, 1 wiersz od dołu: zmiana objętości komory wymaga ...
Przypuszczalnie opis ma się odnosić do zmiany objętości gazu roboczego w cylindrze.

Str.84 tekst zaczynający się od 4 wiersza od dołu jest niejasny i zagmatwany.

Str. 86 brak komentarza odnośnie możliwych skutków wynikających z niezbyt zadawalającego kształtu powierzchni gładzi obu tulei cylindrowych na stanowisku eksperymentalnym.

Str. 89 - pewien niedosyt budzi brak schematu stanowiska badawczego.

Str. 102 zdanie, 8 wiersz od dołu zawiera człon który nie koreluje z wcześniej przedstawionymi stratami energii.

Str. 118 niektóre pozycje literatury nie zostały przytoczone w tekście:
np. 14, 20,23,27,33,48.

5. Charakterystyka umiejętności pozyskiwania informacji oraz naukowego opracowania wyników

Wyniki prac zrealizowanych przez doktoranta w ramach recenzowanej rozprawy doktorskiej obejmują dużą ilość informacji odnoszących się do problematyki współpracy tłoka z cylindrem w silnikach spalinowych. Odnoszą się one zarówno do badań symulacyjnych jak też eksperymentalnych. W celu ich zrealizowania, doktorant opanował umiejętności planowania i wykonania eksperymentu oraz obliczeń z wykorzystaniem metod i programów numerycznych. W rezultacie, doktorant uzyskał duży zasób umiejętności umożliwiających samodzielne organizowanie i prowadzenie badań naukowych. Uzyskane wyniki badań stanowią przyczynek wiedzy poznawczej w zakresie rozpoznania przebiegu procesów silnikowych – zwłaszcza w odniesieniu do zespołu tłok-cylinder.

6. Charakterystyka uzyskanych wyników

Głównymi osiągnięciami recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Emila Wróblewskiego są:

- sformułowanie zapisu matematycznego kształtu powierzchni nośnej płaszcza tłoka,
- implementacja zapisu kształtu powierzchni nośnej płaszcza tłoka, do pakietu programów numerycznych „Kolben” i jej wykorzystanie w badaniach symulacyjnych, celem wypracowania najkorzystniejszego wariantu powierzchni nośnej płaszcza tłoka, pozwalającego na zmniejszenie strat energii na tarcie,
- budowa stanowiska eksperymentalnego, umożliwiającego w zadowalający sposób na porównawczą ocenę wytypowanych rozwiązań

konstrukcyjnych płaszczka tłoka, pod kątem zmniejszenia strat energii na tarcie.

7. Konkluzja

Opierając się na przedstawionej analizie recenzowanej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że jej autor:

- dokonał trafnego wyboru tematyki pracy naukowej,
- osiągnął postawione cele pracy,
- w sposób racjonalny udowodnił postawioną tezę pracy,
- wydał rozprawę doktorską poprawną od strony redakcyjnej,
- uzyskał wyniki rozszerzające wiedzę w zakresie współpracy płaszczka tłoka z gładzią tulei cylindrowej w warunkach smarowania hydrodynamicznego,
- wykazał się umiejętnością prowadzenia badań analitycznych i eksperymentalnych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna,
- poprawnie sformułował wnioski z przeprowadzonych badań oraz zaproponował racjonalny program dalszych prac rozwojowych.

Powyższe osiągnięcia świadczą o nabytych kompetencjach autora rozprawy, pozwalających na prowadzenie samodzielnych badań naukowych w przyszłości.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Emila Wróblewskiego nt. „ *Wpływ mikrogeometrii powierzchni bocznej tłoka na sprawność mechaniczną silnika spalowego*” spełnia wymagania stawiane w Ustawie o stopniach nauko-

wych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz.595), z późniejszymi zmianami (Dz. U. Nr 84 poz. 455) w brzmieniu obowiązującym od dnia 1 października 2011r. Wobec powyższego uważam, że recenzowana rozprawa doktorska może być przyjęta przez Radę Wydziału Inżynierii Transportu Politechniki Poznańskiej oraz dopuszczona do publicznej obrony.

