

dr hab. inż. Paweł Drożdziel, prof. uczelni  
Katedra Zrównoważonego Transportu  
i Źródeł Napędu  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36  
20- 618 Lublin  
p.drozdziel@pollub.pl

Lublin, 30.08.2022 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Tofila pt.:  
*„Badanie trwałości laserowo spawanych nakładek na elektrody świec zapłonowych silników zasilanych paliwami gazowymi”*

### 1. Wprowadzenie

Recenzję rozprawy doktorskiej wykonano na podstawie pisma nr MAA-510/101/2022 z dnia 11.07.2022 r. dra hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej.

### 2. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Szymona Tofila pt.: *„Badanie trwałości laserowo spawanych nakładek na elektrody świec zapłonowych silników zasilanych paliwami gazowymi”* liczy 157 stron tekstu. W skład rozprawy wchodzi: streszczenie w języku polskim i angielskim, wprowadzenie, 6 rozdziałów merytorycznych, podsumowanie i wnioski końcowe oraz spis literatury, rysunków oraz tabel.

Wykaz cytowanej w rozprawie literatury, zawiera 85 pozycji, w tym: 11 krajowych i 6 zagranicznych monografii naukowych, 9 publikacji w czasopismach i konferencjach krajowych oraz 42 publikacje z czasopism i konferencji zagranicznych. Należy podkreślić, że literatura zagraniczna stanowi 60% wszystkich publikacji.

Przywołano także 6 norm i aktów prawnych, 6 opracowań firmowych (w tym 3 zagraniczne) oraz 2 patenty. Należy zaakcentować fakt, że 34% (29 pozycji) cytowanych publikacji i materiałów zostało wydanych w ciągu ostatnich 5 lat. Doktorant umieścił w wykazie literatury 3 opracowania, których jest autorem lub współautorem.

Analiza wykorzystywanej przez Autora rozprawy doktorskiej literatury wskazuje, że przeszedł On bardzo dokładnie zagraniczne i krajowe publikacje dotyczące techniki spawania laserowego nakładek na elektrody świec zapłonowych silników zasilanych paliwami gazowymi oraz oceny trwałości tych świec.

Uwagi krytyczne recenzowanej rozprawy doktorskiej, zawierającej 131 rysunków, 18 tabel oraz 31 wzorów przedstawiono w dalszej części recenzji.

## 2.1. Wybór tematu i zakres pracy

Doktorant w swojej rozprawie doktorskiej bardzo dokładnie wykazał, że istnieje konieczność wprowadzenia do produkcji przez krajowego wytwórcę specjalnych świec zapłonowych charakteryzujących się podwyższoną trwałością, które będą stosowane w silnikach spalinowych zasilanych paliwami gazowymi.

Wynika to z faktu, że warunki spalania mieszanki paliwowo-powietrznej panujące w tych silnikach przyczyniają się do tego, że elektrody świecy zapłonowej o standardowej konstrukcji szybko ulegają zużyciu. Przy nadmiernie zużytych elektrodach może nie wystąpić wyładowanie elektryczne lub będzie ono zbyt słabe, aby zainicjować zapłon mieszanki w cylindrze silnika. Co w konsekwencji wywołuje pogorszenie przebiegu procesu spalania, a tym samym może doprowadzić do zwiększenia zużycia paliwa oraz emisji składników toksycznych w spalinach silników zasilanych paliwami gazowymi.

Według Autora rozprawy zwiększenie czasu, w którym świece zapłonowe mogą poprawnie funkcjonować, wymaga zastosowania na końcówkach ich elektrod, nakładek z materiałów trudnotopliwych, takich jak iryd czy platyna. Wymienione materiały charakteryzują się dużą odpornością na erozję w agresywnym środowisku oraz w podwyższonych temperaturach, jakie panują w cylindrach silników zasilanych paliwami gazowymi.

Zastosowanie nakładek trudnotopliwych wymaga jednak właściwego ich przytwierdzenia do podłoża, jakim jest elektroda ze stopu nikolowo-chromowego. Jest to o tyle skomplikowane, że materiały te różnią się istotnie temperaturami topnienia. W procesie łączenia nakładek z elektrodami świec zapłonowych firmy zagraniczne stosują mikrogrzewania oporowe lub spawanie laserowe. Spawanie laserowe jest metodą dokładniejszą, co powoduje, że obecnie wypiera ona metodę mikrogrzewania oporowego.

Jako że Polski producent świec zapłonowych nie wytwarza świec posiadających nakładki z materiałów trudnotopliwych ważne jest więc opracowanie metody spawania takich nakładek z wykorzystaniem techniki laserowej. Dlatego też, Doktorant podjął się próby przygotowania technologii mikrospawania nakładek z użyciem lasera.

Doktorant w celu opracowania tej technologii przeprowadził szczegółowe analizy literaturowe związane z działaniem świecy zapłonowej, techniki spawania laserowego. Wykonał też, symulacje komputerowe mające na celu wstępny wybór parametrów pracy urządzenia laserowego. Następnie dokonał metalograficzne badania struktury i składu chemicznego spoin łączących nakładkę z elektrodą wykonanych laserem przy wybranych wcześniej wstępnych parametrach jego pracy. Na podstawie przeprowadzonych analiz określił ostatecznie odpowiednie parametry procesu mikrospawania laserowego oraz wykonał serię próbną świec zapłonowych z nakładkami z irydu.





W dalszej kolejności, na autorskim stanowisku laboratoryjnym Doktorant ocenił wpływ spalania metanu w czystym oraz zanieczyszczonym dwutlenkiem siarki powietrzu na zużycie wykonanych własnoręcznie świec zapłonowych z nakładkami przyspawanymi na końcówki ich elektrod. W celu ostatecznego sprawdzenia zaproponowanej w pracy doktorskiej metody mikrosparwania laserowego, w celu połączenia nakładek z materiałów trudnotopliwych z elektrodami świec zapłonowych, wykonał badania oceny ich zużycia w warunkach rzeczywistej eksploatacji silnika spalinowego zasilanego paliwem gazowym.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że zarówno temat rozprawy, jak i zakres dokonanych oraz opisanych przez Autora w rozprawie prac został przeprowadzony właściwie, zgodnie z zasadami dociekań i prac naukowych. Pozwoliło to także, co należy podkreślić, na zastosowanie opracowanej przemysłowej technologii spawania laserowego nakładek z materiałów trudnotopliwych na elektrody świec zapłonowych dla silników spalinowych zasilanych paliwem gazowym.

## **2.2. Ogólna charakterystyka pracy**

W rozdziale pierwszym pt. *Wprowadzenie* Autor pracy szczegółowo uzasadnił, dlaczego zainteresował się tematyką zwiększenia trwałości świec zapłonowych silników zasilanych paliwami gazowymi.

Rozdział drugi pt. *Przegląd problematyki badawczych* dotyczy analizy stanu zagadnienia obejmującej budowę świecy zapłonowej oraz czynników wpływających na jej trwałość. W rozdziale tym omówiono także metodę zwiększania trwałości elektrody świecy zapłonowej przy wykorzystaniu nakładek z materiałów trudnotopliwych spawanych za pomocą techniki laserowej.

W rozdziale trzecim rozprawy zatytułowanym *Cel, teza oraz zakres pracy* Doktorant zaprezentował cel i tezę rozprawy oraz zakres przeprowadzonych prac badawczych.

W rozdziale czwartym pt. *Technologia laserowego spawania nakładek irydowo-platynowych na elektrody świec zapłonowych* Autor rozprawy przedstawił założenia procesu technologii mikrosparwania laserowego nakładek z materiałów trudnotopliwych oraz badania symulacji komputerowych związanych z doбором parametrów dla tego procesu.

W kolejnym piątym rozdziale zatytułowanym *Ocena właściwości uzyskanych złączy* Doktorant dokładnie zaprezentował i omówił przeprowadzone przez Niego badania metalograficzne dotyczące jakości otrzymanych połączeń nakładek z elektrodami świec zapłonowych wykonanych zgodnie z zaproponowaną w rozdziale wcześniejszym technologią spawania laserowego.



Na początku rozdziału szóstego pt. *Badania trwałości świec zapłonowych przeznaczonych do silników zasilanych biogazem* Autor rozprawy przedstawił autorskie stanowisko laboratoryjne symulujące warunki pracy świec zapłonowych z irydowymi nakładami przytwierdzonymi na końcówki ich elektrod (spawanymi laserowo wg technologii zaproponowanej w rozprawie) w silniku spalinowym oraz omówił uzyskane wyniki przeprowadzonych badań stanowiskowych dotyczących wpływu zanieczyszczeń i temperatury pracy świec na ich zużycie. W dalszej części rozdziału Doktorant przeanalizował wyniki badań zużycia świec zapłonowych z irydowymi nakładami w rzeczywistych warunkach pracy silnika spalinowego zasilanego paliwem gazowym.

Ostatni rozdział pt. *Podsumowanie oraz wnioski końcowe oraz propozycje kierunków dalszych badań* zawiera końcowe konkluzje rozprawy doktorskiej opracowane na podstawie przeprowadzonych rozważań literaturowych, symulacji komputerowych oraz badań laboratoryjnych i w warunkach rzeczywistych dotyczących zwiększenia trwałości świec zapłonowych, poprzez laserowe spawanie nakładek irydowych na ich elektrody, dla silnika spalinowego zasilanego paliwem gazowym. W rozdziale tym wskazano także kierunki przyszłych badań, które zamierza wykonać Doktorant.

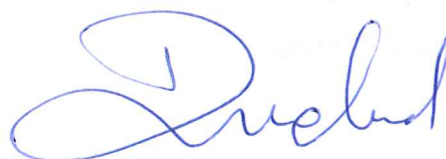
### **2.3. Cel i teza pracy doktorskiej**

Celem naukowym recenzowanej pracy doktorskiej było *rozszerzenie wiedzy z zakresu mikrospawania laserowego materiałów o zróżnicowanych geometriach i temperaturach topnienia oraz wiedzy dotyczącej zagadnień trwałości świec zapłonowych pracujących w silnikach zasilanych paliwami gazowymi, a w szczególności biogazem.*

Celem praktycznym rozprawy było *opracowanie skutecznego spawania nakładek na elektrody świec zapłonowych.*

Tezą pracy zaproponowaną przez Doktoranta było następujące założenie *Możliwe jest zastosowanie laserowego spawania do przytwierdzenia nakładek z materiałów trudnotopliwych na końcówki elektrod świec zapłonowych, zapewniające co najmniej dwukrotne zwiększenie jej trwałości eksploatacyjnej podczas pracy w silnikach zasilanych paliwami gazowymi, a w szczególności biogazem, w porównaniu do takich samych świec bez nakładek.*

Należy stwierdzić, że cel oraz postawiona teza badawcza zostały właściwie sformułowane, a także zweryfikowane przez Doktoranta





## **2.4. Metodyka i obiekt badań**

Obiektem opisanych i przeprowadzonych w rozprawie rozważań były świece zapłonowe z przytwierdzonymi na końcówkach ich elektrod nakładkami z materiałów trudnotopliwych. W pracy doktorskiej opracowano dla nich technologię mikrospawania laserowego, która umożliwiała połączenie nakładek z elektrodami świec. Wymagało to od Autora wykonania następujących prac:

1. zamodelowania procesu spawania nakładek z materiałów trudnotopliwych z elektrodami świec zapłonowych;
2. wykonania metodą mikrospawania laserowego połączenia nakładek z materiałów trudnotopliwych z elektrodami świec zapłonowej wykonanych ze stopu nikolowo-chromowego;
3. przeprowadzenie badań struktury i składu chemicznego spoin w celu oceny własności uzyskanych złączy;
4. wykonanie badań laboratoryjnych zużycia świec zapłonowych na autorskim stanowisku badawczym;
5. przeprowadzenie oceny zużycia świec zapłonowych z nakładkami w warunkach rzeczywistej eksploatacji silnika spalinowego zasilanego paliwem gazowym.

Chciałbym w tym miejscu pochwalić Doktoranta za zakres prac wykonanych w celu realizacji założonego celu i tezy pracy. Wymagało to od Badacza znacznego zaangażowania. Dlatego, należy stwierdzić na podstawie wykonanego przez Doktoranta przeglądu stanu zagadnienia, przeprowadzonych symulacji komputerowych oraz wykonanych badań, że potrafi On rozwiązywać złożone problemy naukowe.

## **2.5. Oryginalność pracy**

Oryginalną wartością recenzowanej rozprawy doktorskiej było opracowanie oraz zweryfikowanie doświadczalnie, na potrzeby krajowego producenta świec zapłonowych, technologii mikrospawania laserowego służącej do przytwierdzania nakładek z materiałów trudnotopliwych na końcówki elektrod świec zapłonowych, które mogą być wykorzystywane w silnikach spalinowych zasilanych paliwami gazowymi.

Należy podkreślić, że zaproponowana technologia mikrospawania laserowego pozwoliła dwukrotnie zwiększyć trwałość świec zapłonowych w silnikach spalinowych zasilanych biogazem.



### 3. Uwagi krytyczne

#### 3.1. Uwagi o charakterze edycyjnym

Pierwszy zbiór uwag o charakterze edycyjnym dotyczy błędów językowych i stylistycznych występujących w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

Podstawowa uwaga dotyczy wielkości występujących w rozprawie akapitów, dla przykładu na stronie 14 akapit liczy 23 wiersze, na stronie 19 liczy aż 24 wiersze, czy też na stronie 69 – 22 wiersze. Podobny sposób wyrażenia myśli możemy spotkać także w innych rozdziałach ocenianej pracy doktorskiej. W mojej ocenie, mniejsze fragmenty tekstu zwiększyłyby zdecydowanie jego czytelność.

Kolejna uwaga dotyczy błędów łamania tekstu. Tzw. „wiszące wiersze” można znaleźć na stronach np. 12, 23, 32, 51, 52 i innych.

Występują także stylistyczne błędy językowe. Dla przykładu – na stronie 17 w drugim wierszu od góry Autor rozprawy napisał *Niezmiennie parametry świecy powinny być utrzymane w całym okresie eksploatacyjnym (możliwie jak najdłuższym) zalecanym przez producenta. Dlatego można postawić pytanie: jak warunki panujące w komorze spalania silnika zasilanego paliwem gazowym wpływają na konstrukcję świecy zapłonowej?* Rodzi się pytanie, o jakie parametry świecy chodzi? Proszę także Autora o odpowiedź, na pytanie które sam postawił.

Z kolei na stronie 20 w drugim akapicie - punkt drugi możemy przeczytać *Wadą tych świec jest ich podatność na „zarzucanie” podczas rozruchu zimnego silnika.* Proszę o zdefiniowanie pojęcia „zarzucanie” silnika.

Na stronach 24 i 25, Autor rozprawy opisuje uszkodzenia, jakim mogą ulec świece zapłonowe oraz identyfikuje przyczyny tych uszkodzeń. Mam prośbę do Autora o podanie literatury, na podstawie której zostało to opracowane.

Z kolei na stronie 44 podrozdział 2.4. Podsumowanie Autor rozprawy pisze *Zastosowanie nakładek na elektrody świecy zapłonowej znacząco zmienia pracę jednostek napędowych wielu maszyn powszechnego użytku dzięki czemu zmniejsza ilość zanieczyszczeń spowodowanych ich eksploatacją.* Proszę Autora rozprawy o wyjaśnienie, jak zmienia pracę zastosowanie nakładek oraz o jakie maszyny powszechnego użytku chodzi.

Podobne niejasne sformułowanie występuje na stronie 47 - końcówka akapitu 2, gdzie czytamy *Środowiska oprogramowania typu Solidworks oraz Simufact Welding są coraz powszechniej stosowane w przedsiębiorstwach m.in. ze względu na dużą ilość informacji pozwalającą w łatwy sposób przyswoić niezbędną podstawową wiedzę do ich obsługi.* Nie-rozumiem tego zdania i proszę o wyjaśnienie.





Pozostałe błędy językowe zostały zaznaczone w tekście rozprawy i przekazane Autorowi.

Pragnę zauważyć, że w recenzowanej pracy doktorskiej występują także niewielkie błędy edycyjne związane z prezentowanymi rysunkami. Dla przykładu: na rysunkach 2.4, 2.5, 2.7, 2.8, 2.10 opis podano w języku angielskim. W mojej opinii nie powinno tak być. Z kolei na rysunku 5.30 znajdują się tzw. wykresy ramkowe i brak jest tutaj opisu elementów dla tego wykresu.

### 3.2. Uwagi o charakterze ogólnym

Moja pierwsza uwaga o charakterze ogólnym dotyczy braku w rozprawie wykazu stosowanych skrótów i oznaczeń, co utrudnia czytanie rozprawy, analizę użytych wzorów oraz prowadzi do niepotrzebnych błędów. Dla przykładu na stronie 40 w opisie wzoru 2.1  $T_0$  oznacza temperaturę początkową materiału, zaś dla wzoru 4.13 ze strony 51  $T_0$  oznacza temperaturę otoczenia. Jednocześnie na stronie 50 w opisie wzoru 4.7 występuje oznaczenie temperatury, jako  $T$  oraz  $T_0$ . Ponadto dla niektórych wielkości fizycznych nie podano też ich jednostek.

Druga uwaga o charakterze ogólnym związana jest z czytelnością niektórych zamieszczonych w rozprawie rysunków. Na wielu z nich (rys. 6.9-6.32 oraz rys. 6.48-6.70) występują zdjęcia szczeliny pomiędzy elektrodami świec zapłonowych, które były poddane badaniom na stanowisku laboratoryjnym oraz w warunkach eksploatacyjnych w silniku spalinowym zasilanym paliwem gazowym. W mojej opinii użyty przez Autora rozprawy ich jedynie słowny opis jest niewystarczający. W celu lepszej interpretacji załączonych fotografii Autor mógłby zaznaczyć na nich wybrane obszary, tak jak to zrobił to na rysunku 5.29 i odnieść się słownie do nich. Byłoby to z korzyścią dla czytelnika podczas analizy tych rysunków. Proszę Doktoranta, aby na publicznej obronie przedstawił w taki właśnie sposób wybrane przez Siebie dwie fotografie.

### 4. Pytania do Autora pracy

1. Na stronie 86 rozprawy czytamy *Dodatkowo w przypadku próbek przedstawionych na rysunkach 5.21-5.27 błąd podczas ustawiania miejsca padania wiązki (rys. 4.13) spowodował znaczne uszkodzenie materiału podłoża nakładki lub elektrody, co skutkowało niepoprawnym wykonaniem spoiny*. Mam pytanie do Doktoranta, kiedy ten błąd ustawienia został stwierdzony?




2. Na stronie 90 Autor rozprawy stwierdza *Dzięki przeprowadzonym badaniom rozpoznano zależności jakości spoiny od parametrów spawania laserowego.* Proszę o podanie tej zależności.
3. Na stronie 97 rozprawy w części zatytułowanej „Wyniki badań laboratoryjnych oraz wnioski” czytamy *Ocena stopnia zużycia była mierzona poprzez pomiar szerokości szczeliny dla obu wariantów testu.* Wynika z tego, że miarą zużycia elektrod świecy zapłonowej jest zmiana szerokości szczeliny pomiędzy elektrodami świec zapłonowej. Proszę zatem Doktoranta o odpowiedź na pytanie, ile wynosi wartość zużycia granicznego dla elektrod świecy zapłonowej podczas pracy w silniku spalinowym zasilanym oczyszczonym paliwem gazowym?
4. Na stronie 139 w punkcie 1 podrozdziału 6.3. pt.: *Wnioski końcowe badań laboratoryjnych i eksploatacyjnych* oraz w punkcie 2 ze strony 142 możemy przeczytać, że trwałość świec zapłonowych z nakładkami z materiałów trudno topliwych na elektrody wynosi 1600 godzin. Z kolei na stronie 126 w części zatytułowanej *Metodyka badań* oraz w opisie tabeli 6.4 ze strony 132, a także na stronie 136 znajdujemy informację o 1500 godzinach pracy silnika spalinowego w siłowni. Rodzi to pytanie skąd taka rozbieżność w godzinach pracy?
5. Na stronach od 97 do 116 występują rysunki ze zdjęciami elektrod świec zapłonowych o numeracji 31-42, które były badane na stanowisku laboratoryjnym. Proszę Doktoranta o podanie na publicznej obronie schematu rozmieszczenia tych świec.

### **5. Ocena rozprawy i wniosek końcowy**

Pomimo przedstawionych przeze mnie w punkcie 3 uwag krytycznych, recenzowaną rozprawę doktorską Pana mgr inż. Szymona Tofila oceniam pozytywnie. Ma ona znaczenie aplikacyjne, co zostało wykazane przez Doktoranta we wnioskach końcowych.

Doktorant wykazał się bardzo dobrą analizą stanu zagadnienia, zrozumieniem problematyki odnoszącej się do przedmiotu badań oraz znajomością analiz z wykorzystaniem metod symulacji komputerowych, technologii mikrospawania laserowego, badań metalograficznych, stanowiskowych oraz w warunkach eksploatacyjnych. Biorąc pod uwagę całość pracy tj. jej wartość poznawczą i użyteczną oraz znaczący wkład własny uważam, że Doktorant rozwiązał ważny problem z zakresu dyscypliny naukowej **inżynieria mechaniczna**.





Dlatego też stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgra inż. Szymona Tofila pt.: „*Badanie trwałości laserowo spawanych nakładek na elektrody świec zapłonowych silników zasilanych paliwami gazowymi*” spełnia wymogi obowiązujących przepisów w odniesieniu do prac doktorskich.

Wnoszę, zatem o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Na podstawie analizy wykonanych i opisanych przez Doktoranta badań należy stwierdzić, że potrafi On rozwiązywać złożone problemy naukowe oraz, że przedstawiona rozprawa doktorska ma zastosowanie uytylitarne. W związku z powyższym, w przypadku pozytywnego przebiegu obrony, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Szymona Tofila pt.: „*Badanie trwałości laserowo spawanych nakładek na elektrody świec zapłonowych silników zasilanych paliwami gazowymi*”.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'S. Tofil', is centered on the page. The signature is fluid and cursive, with a large initial 'S' and a trailing flourish.

