

prof. dr hab. inż. Ryszard Pawlak,
Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Informatyki i Automatyki
Politechniki Łódzkiej
ul. B. Stefanowskiego 18; 90-537 Łódź

Łódź, 30.09.2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Tofila

**p.t. „BADANIE TRWAŁOŚCI LASEROWO SPAWANYCH NAKŁADEK NA ELEKTRODY ŚWIEC
ZAPŁONOWYCH SILNIKÓW ZASILANYCH PALIWAMI GAZOWYMI”**

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej przekazanej przez Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Pana dra hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk., pismem z dnia 11.07.2022 r. Praca doktorska została wykonana w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna pod opieką promotorską prof. dra hab. inż. Bogdana Antoszewskiego.

1. Ocena doboru tematu, celu i tez rozprawy

Pomimo kilkudziesięciu lat rozwoju techniki laserowej oraz zastosowań laserów, także technologicznych, ich obecność w polskich firmach produkcyjnych zwiększa się powoli. Do pewnego stopnia jest to wynik stosunkowo wysokich cen urządzeń laserowych, ale także niedostatecznej wiedzy gremiów kierowniczych i kadry inżynierskiej o zaletach i przewadze technologii laserowych nad tradycyjnymi technikami wytwarzania. Doktorant, jako pracownik Katedry Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych, związanej z Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej i Polskiej Akademii Nauk, słusznie wybrał temat rozprawy, który promuje technologię laserową i przynosi określone korzyści związane z eksploatacją urządzeń, które powstały z jej udziałem. Oczywiście laser nie jest prostym narzędziem, do zastosowania przez każdego w dowolnym miejscu produkcji. Niezbędne jest naukowe podejście do problemu, który chcemy rozwiązać, posługując się laserami. Zatem tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Szymona Tofila **p.t. „Badanie trwałości laserowo spawanych nakładek na elektrody świec zapłonowych silników zasilanych paliwami gazowymi”** wpisuje się w nurt badań o najwyższej aktualności. Recenzowana praca ma charakter interdyscyplinarny. Główny nurt badań Doktoranta mieści się w dyscyplinie *Inżynieria mechaniczna*. Praca zawiera także dokonania w zakresie badań własności materiałów, należące do dyscypliny *Inżynieria materiałowa*.

2. Charakterystyka i ocena treści merytorycznej rozprawy

W **Streszczeniu** Doktorant precyzyjnie opisuje zawartość pracy. W Rozdziale **1. Wprowadzenie** autor umiejscawia problematykę pracy, wskazując na rozpowszechnianie się silników spalinowych zasilanych gazem lub biogazem, jako alternatywy dla silników spalających pochodne ropy naftowej. Zarówno stosowanie paliwa gazowego, jak i doskonalenie pracy silników, wynikają z przesłanek ekologicznych. Proces spalania w silniku przebiegający w sposób nieoptymalny prowadzi nie tylko do obniżenia sprawności energetycznej, ale jest przyczyną zwiększonej emisji gazów, w ogromnej większości szkodliwych dla środowiska. Dobre spalanie paliwa uwarunkowane jest m.in. właściwym zapłonem, co powinna zapewniać odpowiednia konstrukcja świecy zapłonowej. Wymagania względem pracy świecy są ostrzejsze w przypadku spalania biogazu. Autor pracy postanawia modyfikować elektrody świecy poprzez laserowe spawanie na ich powierzchni nakładek z materiałów trudno topliwych (iryd lub platyno-iryd), czyli charakteryzujących się zwiększoną odpornością na elektroerozję oraz korozję. Nawiązuje w tym miejscu do technologicznych zastosowań laserów, określając ich przewagę wobec innych, tradycyjnie stosowanych w przemyśle technik obróbki materiałów. Zdaniem recenzenta, ta całkowicie słuszna ocena laserowych technologii materiałowych, mogłaby zostać poparta konkretnymi wartościami parametrów technologicznych.

W Rozdziale **2. Przegląd problematyki badawczych** Doktorant charakteryzuje technologię mikrospawania laserowego i sygnalizuje zagadnienia związane z tą technologią. Tu również korzystne okazałoby się uzupełnienie tej charakterystyki danymi liczbowymi. Dalszą część rozdziału poświęca autor podmiotowi swoich działań, czyli świecy zapłonowej. Omawia budowę i rodzaje świec oraz czynniki wpływające na jej trwałość. Analizuje zagadnienia eksploatacyjne związane z działaniem świecy, warunkujące poprawny zapłon. Opisuje dwa zasadnicze rodzaje świec – świece gorące oraz świece zimne, charakteryzujące się m.in. inną liczbą wyróżnika wartości cieplnej, nie podając jednakże definicji tego parametru. Omawia problemy erozji i korozji świec oraz analizuje metody badania ich trwałości. Z rozważań tych wynika, że jednym z podstawowych parametrów, a jednocześnie dającym się stosunkowo łatwo zmierzyć, jest odległość elektrod świecy. Prawidłowa szczelina między elektrodami z jednej strony warunkuje poprawny zapłon, z drugiej natomiast jej zmieniająca się wielkość jest miarą zużywania się elektrod podczas pracy. Świece w silnikach spalających biogaz szybciej ulegają erozji i korozji. Autor omawia nowe rozwiązania mające poprawić skuteczność zapłonu i wydłużyć żywotność świec dzięki nakładkom z materiałów trudno topliwych spawanych z elektrodami. Podaje przykładowe rozwiązania stosowane w tym zakresie przez producentów świec. Druga część Rozdziału 2. poświęcona jest różnym aspektom problematyki laserowej. Doktorant wskazuje przewagę mikrospawania laserowego nad innymi technikami spawalniczymi. Omawia rodzaje, budowę i działanie laserów stosowanych do tych operacji technologicznych. Parametry urządzeń laserowych zamieszcza w tabeli 2.1. Nie ustrzegł się jednakże błędu, podając sprawność laserów na ciele stałym pompowanych diodami równą 1-4 %, podczas gdy wynosi ona 20-25 %. Autor charakteryzuje następnie spawanie laserowe typu przewodnościowego, opisuje ważne zjawiska

towarzyszące procesowi, jak absorpcja, przewodzenie ciepła, topnienie, rolę plazmy zapalającej się nad jeziorkiem spawalniczym oraz rolę gazów ochronnych. Rozdział kończy podsumowanie wynikające z przeprowadzonej analizy literaturowej zagadnień badawczych.

Rozdział **3. Cel, teza oraz zakres pracy.** Doktorant wykorzystuje wnioski z analizy literaturowej odnośnie wiedzy z zakresu mikrospawania laserowego oraz kierunków rozwoju świec zapłonowych, poparte, jak stwierdza, *własnym doświadczeniem laboratoryjnym i półprzemysłowym* i formułuje:

Cel naukowy rozprawy - 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.

Cele praktyczny - opracowanie skutecznego spawania nakładek na elektrody świec zapłonowych.

Osiągnięcie tych celów ma umożliwić udowodnienie następującej **tezy pracy**:

„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”.

Dla tak określonych zamierzeń definiuje zadania badawcze oraz określa zakres pracy.

W pierwszej części **Rozdziału 4. Technologia laserowego spawania nakładek irydowo – platynowych na elektrody świec zapłonowych** Doktorant omawia założenia i wyniki modelowania procesu laserowego spawania nakładek na elektrody świecy. Głównym celem tego modelowania była ocena wpływu parametrów procesu na stan termiczny, pole naprężeń oraz geometrię strefy przetopionej. Autor nawiązuje do modelowania procesu w środowisku programistycznym Ansys-Fluent, którego był współautorem w trakcie realizacji projektu NCBiR. Dla celów pracy posługuje się programem Simufact Welding, w którym przyjmuje się uproszczenia polegające na uwzględnieniu konwekcji jedynie na granicy fazy stałej i ciekłej oraz tłumienia absorpcji na etapie określania energii źródła ciepła na powierzchni spawanych elementów. Wyniki modelowania w postaci obrazu pól temperaturowych doprowadziły do wielu wniosków, z których najważniejszy mówi o braku możliwości przetopienia całej powierzchni styku nakładki i elektrody bez przekroczenia temperatury wrzenia niklu i platyny. Konsekwencją tego faktu jest przyjęcie założenia, że nakładka powinna być wstępnie zgrzewana do elektrody. Wszystkie dalsze badania były prowadzone z nakładkami wstępnie zgrzewanymi. Badania doświadczalne spawania nakładek wymagały skonstruowania specjalistycznego oprzyrządowania pozycjonującego spawane elementy. Wybierając ostatecznie do prac doświadczalnych obrabiarkę laserową *Rofin Integral* autor przeprowadził próby spawania nakładek przy zmiennych parametrach procesu wynikających z symulacji. Ostatecznie próby do dalszych badań wykonano dla następujących parametrów: energia impulsu 1,62-4,2 J; czas trwania impulsu 1-2 ms; częstotliwość powtarzania impulsów 50 Hz; prędkość przesuwu próbki

względem osi wiązki laserowej 120 mm/s. Wszystkie próby wykonano dla dwu wariantów: *N* - elementy spawane w temperaturze pokojowej; *G* – elementy podgrzane do temperatury 750 °C. W Rozdziale 5. ***Ocena właściwości uzyskanych złączy*** omówiono przebieg i wyniki badań makroskopowych, mikroskopowych oraz badania struktury i składu połączeń spawanych. Zastosowanie mikroskopii optycznej posłużyło do oceny lica spoiny, ewentualnej obecności mikropęknięć. Skaningowa mikroskopia elektronowa SEM wykorzystana została do obserwacji zgładów metalurgicznych, dokładnej oceny pęknięć i ich propagacji oraz analizy składu spoiny. Na podstawie obserwacji SEM oraz analizy liniowej rozkładu pierwiastków w różnych obszarach spoiny Doktorant uznał, że korzystne cechy wykazywała spoina oznaczona jako 4G (podgrzewana w trakcie spawania), wykonana impulsami o energii 1,8 J i czasie trwania impulsu 1,5 ms, z uwagi na brak pęknięć i zadowalającą głębokość przetopienia i wymieszania się spajanych elementów. Wszystkie próbki do dalszych badań były wykonane przy tych wartościach parametrów.

Rozdział 6. ***Badania trwałości świec zapłonowych przeznaczonych do silników zasilanych biogazem*** to bardzo wartościowa część pracy. Wyniki badań opisanych w tym rozdziale ostatecznie potwierdzają realizację celów pracy i wykazują słuszność tezy. Badania eksploatacyjne przeprowadzone zostały w dwu etapach. Pierwszy, laboratoryjny zrealizowano w Politechnice Świętokrzyskiej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki. Doktorant zaprojektował i zbudował stanowisko do badania trwałości świec, w którym elektronicznie modulowano częstotliwość wyładowań pomiędzy elektrodami świecy. W komorze poddawano spalaniu mieszanek metanu i powietrza imitującą skład biogazu. Stanowisko umożliwiała pracę świec na 3 poziomach o różnej temperaturze, aby można było zidentyfikować występowanie zjawiska samooczyszczania się świec. Dodatkowa instalacja umożliwiała dopływ dwutlenku siarki, jako zanieczyszczenia towarzyszącego biogazowi. Jednocześnie badano 12 świec rozmieszczonych na trzech poziomach. Częstotliwość zapłonów była równa 500 Hz, co w ciągu 40 godzin badań odpowiadało 1600 godzinom pracy silnika w rzeczywistych warunkach. Elektrody świec poddano następnie obserwacjom z wykorzystaniem mikroskopii optycznej. Oceniano przede wszystkim wygląd nakładek, występowanie ubytków erozyjnych i obecność nagaru. Do ilościowej oceny zużycia elektrod wybrano pomiar wielkości szczeliny międzyelektrodowej. Wyniki tych pomiarów zestawiono w Tabeli 6.1. oraz pokazano na wykresach. Wielkość szczeliny zwiększała się prawie liniowo wraz z postępującym czasem badania dla wszystkich świec pracujących w gazie bez zanieczyszczenia. Udowodniono natomiast, że praca świec w gazie z dodatkiem SO₂ ma negatywny wpływ na wielkość szczeliny, która zmniejsza się wskutek przyrostu nagaru, co oczywiście jest zjawiskiem negatywnym. Potwierdziły się także hipotezy Doktoranta odnośnie wpływu temperatury na zdolność świec do samooczyszczania. Proces ten zachodził skutecznie dla świec pracujących w wyższej temperaturze. Co bardzo istotne, tę trudną próbę laboratoryjną przetrwały wszystkie spawane nakładki. Przemysłowe badania eksploatacyjne to drugi etap, w którym badano trwałość świec. Świece z nakładkami spawanymi laserowo przez Doktoranta zamontowano w silniku napędzającym agregat prądotwórczy w oczyszczalni ścieków, która jest jednocześnie

producentem biogazu spalanego w silniku. Podobnie jak po badaniach eksploatacyjnych laboratoryjnych wykonano obrazy mikroskopowe elektrod oraz zmierzono wielkość szczeliny międzyelektrodowej. We wszystkich badanych świecach stwierdzono powiększenie się szczeliny, średnio o około 230 μm , czyli znacznie więcej niż po próbach laboratoryjnych, jednakże praca w rzeczywistym silniku, przy zasilaniu biogazem, odbywa się w o wiele trudniejszych warunkach. Na powierzchni nakładek zaobserwowano ślady wynikające z zanieczyszczeń olejowych oraz obecności SO_2 . Najważniejszy wniosek z tych badań, to bezawaryjna praca silnika ze świecami z nakładkami spawanymi laserowo przez 1500 godzin, podczas gdy świece bez nakładek z materiałów trudnotopliwych należało, zgodnie z zaleceniami producenta, wymienić po maksymalnie 800 godzinach. Żadna z nakładek nie uległa odspojeniu, co świadczy dobrze o opracowanej metodzie laserowego spawania.

Rozdział 7. **Podsumowanie oraz wnioski końcowe oraz propozycje kierunków dalszych badań** to krótki opis najważniejszych zrealizowanych prac. Większość była wzmiankowana już wcześniej. W tym miejscu należy zdecydowanie podkreślić informację podaną przez Doktoranta, że opracowana w ramach pracy doktorskiej technologia laserowego spawania nakładek z materiałów trudnotopliwych na elektrody świec **została wdrożona do produkcji**, a autor rozprawy **osobiście wykonuje małoseryjne spawanie nakładek**.

Wymienione przez Doktoranta kierunki dalszych badań oceniam pozytywnie. Mógłbym dodatkowo sugerować rozważenie praktycznej realizacji problemu zasygnalizowanego w p.3, Uwaga 4.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

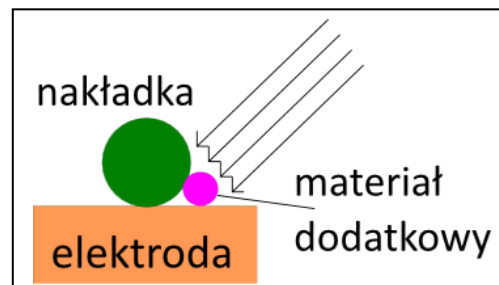
W pracy zauważono następujące **zagadnienia dyskusyjne i błędy**, zatem recenzent oczekuje ustosunkowania się autora do następujących uwag:

- 1) Na str. 73 autor napisał: „*Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że w trakcie procesu grzewania nakładki wymieszanie się łączonych elementów występuje w niewielkim stopniu.*” Według recenzenta Rys. 5.6 oraz wyniki zamieszczone w Tabeli 5.1. i Tabeli 5.2. nie potwierdzają tego.
- 2) Doktorant nie rozważał w pracy bardziej szczegółowo cech metalurgicznych spoiny. Jakie jest powinowactwo metalurgiczne metali wchodzących w skład materiału spoiny i jaki mógłby być wpływ faz powstających w spoinie na pracę świecy ze spawaną nakładką? Chyba w tym obszarze należałoby poszukiwać zwiększonej mikrotwardości próbek spawanych według wariantu G (str.90, wiersz 1). Tym bardziej, że wstępne podgrzewanie mogło przyczynić się raczej do zmniejszenia koncentracji naprężeń termicznych, co skutkowałoby zmniejszeniem mikrotwardości.
- 3) Obraz EM przekroju próbki 6G ujawnił zbyt duże stopienie materiału elektrody, podobnie obraz przekroju próbki 7, co autor uznał za efekt błędnego pozycjonowania wiązki laserowej. Pytanie 1: W jaki sposób mógł wystąpić błąd pozycjonowania

wiązki. Pytanie 2: Dlaczego takich próbek nie zdyskwalifikowano, jako wadliwie zespawanych?

4)

Czy możliwe byłoby spawanie nakładki bez wstępnego jej zgrzewania, za to z zastosowaniem dodatkowego materiału (drutu), jak to schematycznie pokazano na rysunku obok?



Błędy językowe

Poszczególne rozdziały prezentują zróżnicowany poziom poprawności językowej. Łatwo dostrzec, że autor zwrócił szczególną uwagę na dokonanie dokładnej korekty językowej rozdziałów: 1. Streszczenie, 3. Cel, teza oraz zakres pracy, 7. Podsumowanie oraz wnioski końcowe oraz propozycje kierunków dalszych badań, a także podrozdziału 4.1. Modelowanie procesu spawania nakładek z materiałów trudno topliwych, które pod względem językowym napisane są na dobrym poziomie. Tekst rozdziałów 5. Ocena właściwości uzyskanych złączy, 6. Badania trwałości świec zapłonowych przeznaczonych do silników zasilanych biogazem również nie zawiera większej liczby błędów językowych. Natomiast w rozdziałach 2. oraz 4. zauważyłem wiele powtarzających się nieprawidłowości językowych. Do szczególnie stresujących trzeba zaliczyć:

- Zbędne uzupełnienia zdań kolejnym określeniem, zdaniem lub równoważnikiem, które w oczywisty sposób powtarzają wyrażoną już wcześniej myśl zdania głównego, np.:
 - Str.11, wiersz 33: „Badane świece zapłonowe zostały wyposażone w specjalnie przygotowane nakładki na elektrody, wykonane z materiałów trudno topliwych (iryd i/lub platyna) i wytrzymałych na trudne warunki eksploatacyjne ~~w jakich muszą pracować.~~” – warunki eksploatacyjne, to właśnie te, w jakich świece muszą pracować.
 - str. 12, wiersz 5: „Ze względu na wyjątkową dynamikę wiązki laserowej i znacząco wysoką gęstość energii można ją z powodzeniem stosować z doskonałymi wynikami ~~do obróbki wielu różnych materiałów.~~” – jeśli z powodzeniem, to oczywiste jest, że z doskonałymi wynikami.
 - str. 16, wiersz 6: „...świeca zapłonowa w rzeczywistości musi sprostać wielu nie lada wyzwaniom stawianym jej przez coraz to nowsze konstrukcje silnika spalinowego, ~~w którym pracuje.~~” – czy wyzwania mogą dotyczyć jakiejś innej świcy niż ta, która pracuje w silniku?!
 - str. 19, wiersz 11: „Bardzo często rola świcy zapłonowej jest bagatelizowana przez użytkowników, przez co łatwo jest uszkodzić silnik, ~~w którym się ona znajduje.~~” - czy świeca może uszkodzić silnik inny niż ten, w którym się znajduje?
 - str. 62, wiersz 35: „...użytego do wstępnego podgrzewania elementów świec (wariant G) przed wykonywaniem spawania laserowego na stanowiskach przedstawionych na rysunku 4.7” – nie było innych wariantów spawania, jak tylko na tych stanowiskach.

- str. 124, wiersz 32: „Oczyszczalnia ta produkuje biogaz, którym następnie zasila silniki spalinowe generatorów prądotwórczych dzięki czemu jest w stanie pokryć swoje zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz ciepłą, które są niezbędne do jej funkcjonowania [74].” – jeśli swoje zapotrzebowanie, to oczywiste, że ta energia elektryczna i ciepło są niezbędne do jej funkcjonowania.
- str. 135, wiersz 13: „Badania eksploatacyjne pozwoliły potwierdzić wyniki badań laboratoryjnych, iż opracowywana technologia spawania nakładek na elektrody świec zapłonowych zwiększy ich trwałość, co przynosi oczekiwane rezultaty.” – jeżeli zwiększy trwałość, to już oznacza osiągnięcie oczekiwanych rezultatów.
- str.136, wiersz 9: „Zastosowanie nakładek z materiałów trudnotopliwych i bardziej wytrzymałych na negatywne działanie środowiska silnie korozyjnego, jakie panuje w komorze spalania silnika spalinowego zasilanego biogazem, powoduje zwiększenie ich trwałości dzięki czemu mogą pracować poprawnie znacznie dłużej od swoich odpowiedników bez nakładek.” – jeżeli zwiększenie trwałości, to oczywiste, że mogą pracować dłużej...
- str.136, wiersz 25: „...została z powodzeniem wdrożona do przemysłu i jest w stanie konkurować z innymi produktami tego typu oferowanymi przez producentów, którzy także zaopatrują rynek w świece zapłonowe.” – nie może być konkurencji ze strony producentów innych wyrobów, więc po co to powtórzenie.
- str.136, wiersz 30: „...wraz ze świecami produkowanymi przez ISKRA Zakłady Precyzyjne Sp. z o.o. wykonywanymi zgodnie z opracowywaną technologią opisaną w poprzednich rozdziałach niniejszej rozprawy.” – tylko jedna technologia jest opracowywana w rozprawie.
- Używanie języka pompatycznego, niewłaściwego dla opracowania naukowego lub sformułowań zbyt oczywistych, np.:
 - „Ludzkość buduje coraz większe i bardziej skomplikowane konstrukcje, które muszą charakteryzować się jak największym bezpieczeństwem.”
 - „Wszystkie te okoliczności sprawiły, że spawalnictwo w bardzo krótkim czasie przeniosło się z domowego warsztatu do szeroko rozumianego przemysłu – od głębin oceanu do podboju kosmosu.”
 - „Postępujący proces miniaturyzacji powoduje, że w wielu rozwiązaniach mamy do czynienia ze spawaniem elementów małogabarytowych.”
 - „Świece zapłonowe, tak jak wiele innych podzespołów silnika spalinowego o zapłonie iskrowym, muszą działać prawidłowo, aby ów silnik mógł wykonywać wyznaczoną mu pracę.”
- Zdania z wyraźnymi błędami stylistycznymi i gramatycznymi, przykłady przedstawione w poniższej tabeli:

Numer strony	wiersz	Tekst do korekty
12	22	Jest napisane: „Projektanci często skupiają się na redukcji masy wytwarzanych detali a także na zmniejszeniu masy materiałów drogich i deficytowych.”, natomiast powinno być napisane: Projektanci często skupiają się na redukcji masy wytwarzanych detali, a także na zmniejszeniu zużycia materiałów drogich i deficytowych.
16	22	Jest napisane: „Budowa świecy zapłonowej to stosunkowo prosta konstrukcja.”, natomiast powinno być napisane: Świeca zapłonowa ma stosunkowo prostą konstrukcję.
16	29	Jest napisane: „Z biegiem lat konstrukcja świecy zapłonowej nie ulegała znacznym zmianom, w przeciwieństwie do materiałów, z których ją wykonywano.”, natomiast powinno być napisane: Z biegiem lat konstrukcja świecy zapłonowej nie ulegała znacznym zmianom, modyfikowano natomiast materiały, z których ją wykonywano.

17	10	Jest napisane: „Układy zapłonowe z podtrzymaniem plazmy stanowią obiecującą alternatywę dla konwencjonalnych świec zapłonowych do tych zastosowań, w których warunki w komorze spalania są trudniejsze dla działania konwencjonalnych świec zapłonowych, takich jak silniki spalinowe o wysokich wartościach współczynnika sprężania lub zubożania ładunku dolotowego.” , natomiast powinno być napisane: <i>Układy zapłonowe z podtrzymaniem plazmy stanowią obiecującą alternatywę dla konwencjonalnych świec zapłonowych do tych zastosowań, w których warunki w komorze spalania są trudniejsze dla działania konwencjonalnych świec zapłonowych. Dotyczy to silników spalinowych o wysokich wartościach współczynnika sprężania lub zubożania ładunku dolotowego.</i>
17	14	Jest napisane: „Autorzy ww. artykułu przedstawili wyniki eksperymentalnej czynności przeprowadzonej na silniku wewnętrznego spalania o zapłonie iskrowym wyposażonym w układ zapłonowy plazmowy o częstotliwości radiowej (ang. RFSI - Radio Frequency sustained Plasma Ignition System).” , natomiast powinno być napisane: <i>Autorzy ww. artykułu przedstawili wyniki eksperymentów przeprowadzonych na silniku wewnętrznego spalania o zapłonie iskrowym wyposażonym w układ zapłonowy plazmowy o częstotliwości radiowej (ang. RFSI - Radio Frequency sustained Plasma Ignition System). Co to jest eksperymentalna czynność?</i>
21	5	Jest napisane: „W świecach tych występują najkorzystniejsze warunki przepływu przejętego ciepła przez stożek, które ze względu na swoje zalety są najczęściej stosowane we wszystkich typach silników.” , natomiast powinno być napisane: <i>W świecach tych występują najkorzystniejsze warunki przepływu przejętego ciepła przez stożek, dlatego takie świece ze względu na swoje zalety są najczęściej stosowane we wszystkich typach silników.</i>
23	9	Jest napisane: „Na rysunku 2.5 przedstawiono wykres odporności testowanych pierwiastków wykorzystywanych jako nakładki na zużycie w zależności od utleniania i energii iskry w odniesieniu do platyny.” , natomiast powinno być napisane: <i>Na rysunku 2.5 przedstawiono wykres odporności testowanych metali, wykorzystywanych jako nakładki, na zużycie w zależności od utleniania i energii iskry w odniesieniu do platyny.</i>
34	2	Jest napisane: „Kolejną ich zaletą jest także zastosowanie krótszej długości fali promieniowania laserowego – ok. 1 μm w porównaniu z laserami CO ₂ , co bezpośrednio przekłada się na możliwość transportu promieniowania laserowego z rezonatora do głowicy laserowej z użyciem światłowodów.” , natomiast powinno być napisane: <i>Kolejną ich zaletą jest także zastosowanie promieniowania laserowego o krótszej długości fali – ok. 1 μm w porównaniu z laserami CO₂, co bezpośrednio przekłada się na możliwość transportu promieniowania laserowego z rezonatora do głowicy laserowej z użyciem światłowodów. Nie stosujemy <u>długości fali</u>, ale promieniowanie o określonej długości.</i>
35	20	Jest napisane: „Najnowsze osiągnięcia doprowadziły do powstania tzw. laserów dyskowych oraz włóknowych, których konstrukcja ośrodka czynnego w rezonatorze jest oparta na ciele stałym.” , natomiast powinno być napisane: <i>Najnowsze osiągnięcia doprowadziły do powstania tzw. laserów dyskowych oraz włóknowych, których ośrodek czynny jest ciałem stałym.</i>
37	8	Jest napisane: „W rezultacie tego wysoka sprawność laserów włóknowych przekłada się na wysoki współczynnik przetwarzania mocy. Jest on stosunkiem mocy wiązki laserowej wygenerowanej przez włókna do mocy elektrycznej jaka jest potrzebna do wygenerowania promieniowania laserowego.” , natomiast powinno być napisane: <i>W rezultacie tego lasery włóknowe charakteryzują się dużą sprawnością, określoną jako stosunek mocy wiązki laserowej emitowanej przez włókno, do mocy elektrycznej, jaka jest potrzebna do wygenerowania promieniowania laserowego.</i>
38	24	Jest napisane: „Spoiny wykonane przy użyciu lasera często posiadają lepsze właściwości od spawania wiązką elektronów.” , natomiast powinno być napisane: <i>Spoiny wykonane przy użyciu lasera często posiadają lepsze właściwości od spoin spawanych wiązką elektronów.</i>
38	25	Jest napisane: „Do spawania w skali mikro najlepiej nadają się lasery Nd:YAG ze względu na swoje właściwości i łatwą absorpcję dla wielu materiałów konstrukcyjnych, a także za łatwość ich zastosowania i relatywnie niskie koszty nabycia.” , natomiast powinno być napisane: <i>Do spawania w skali mikro najlepiej nadają się lasery Nd:YAG ze względu na swoje właściwości i dużą absorpcję promieniowania przez wiele materiałów konstrukcyjnych, a także za łatwość ich zastosowania i relatywnie niskie koszty zakupu.</i>
38	31	Jest napisane: „Nowoczesne lasery włóknowe mogą też być ogniskowane do mniejszej średnicy plamki – kilkudziesięciu lub nawet kilkunastu mikrometrów, co znacząco ułatwia proces miniaturowego

		spawania.” , natomiast powinno być napisane: <i>Nowoczesne lasery włóknowe mogą też być ogniskowane do plamki o mniejszej średnicy – kilkudziesięciu lub nawet kilkunastu mikrometrów, co znacząco ułatwia proces miniaturowego spawania.</i>
38	33	Jest napisane: „Niestety cena takich urządzeń jest wciąż dość wysoka, dlatego do wielu zastosowań nadal wybiera się lasery Nd:YAG, który także został wybrany do badań przeprowadzonych przez autora niniejszej rozprawy.” , natomiast powinno być napisane: <i>Niestety cena takich urządzeń jest wciąż dość wysoka, dlatego do wielu zastosowań nadal wybiera się lasery Nd:YAG. Taki laser został także wybrany do badań przeprowadzonych przez autora niniejszej rozprawy.</i>
39	21	Jest napisane: „Niczym nie poczerniona stal wchłania około 25% promieniowania lasera Nd:YAG a promieniowania lasera CO2 tylko 5% - czyli około 5 razy mniej.” , natomiast powinno być napisane: <i>Niczym nie poczerniona stal absorbuje około 25% promieniowania lasera Nd:YAG, a promieniowania lasera CO2 tylko 5% - czyli około 5 razy mniej.</i>
39	25	Jest napisane: „Spawanie przewodnościowe dla stali jest zazwyczaj do głębokości 1 mm natomiast dla aluminium jest to od 0,5 do 2 mm.” , natomiast powinno być napisane: <i>Spawanie przewodnościowe stali jest realizowane do głębokości 1 mm, natomiast dla aluminium głębokość spawania wynosi od 0,5 do 2 mm.</i>
40	5	Jest napisane: „ $T(0,t)$ - temperatura w środku wiązki laserowej ($r=0$) na powierzchni spawanego materiału,” , natomiast powinno być napisane: <i>$T(0,t)$ - temperatura w centrum obszaru oddziaływania wiązki laserowej ($r=0$) na powierzchni spawanego materiału;</i> Nie istnieje pojęcie „środek wiązki laserowej”.
40	19	Jest napisane: „Bardziej skomplikowaną, ale dokładniejszą metodą na obliczenie warunków progowych dla procesu spawania laserowego metodą przewodnościową jest skorzystanie z równań Cline’a i Anthony’ego [1].” , natomiast powinno być napisane: <i>Bardziej skomplikowaną, ale dokładniejszą metodą obliczania warunków progowych dla procesu spawania laserowego przewodnościowego jest analiza wykorzystująca równania Cline’a i Anthony’ego [1].</i>
40	32	Jest napisane: „Średnica ogniska wiązki laserowej przy danym rodzaju promieniowania jest proporcjonalna do długości ogniskowej f i długości fali promieniowania laserowego λ (wiązki laserowej).” , natomiast powinno być napisane: <i>Średnica zogniskowanej wiązki laserowej jest proporcjonalna do długości ogniskowej f obiektywu oraz długości fali λ promieniowania laserowego.</i>
41	9	Jest napisane: „Doprowadzenie wiązki światła laserowego z rezonatora w obszar spawania obarczony jest jedynie niewielkimi stratami energii spowodowanymi użyciem elementów przewodzących, tj. zwierciadeł, przesłon i układów optycznych oraz w wyniku jonizacji gazów w powietrzu.” , natomiast powinno być napisane: <i>Doprowadzenie wiązki światła laserowego z rezonatora w obszar spawania obarczone jest jedynie niewielkimi stratami energii spowodowanymi użyciem elementów przewodzących, tj. zwierciadeł, przesłon i układów optycznych oraz absorpcją w powietrzu powodującą jonizację gazów.</i>
41	25	Jest napisane: „Spawanie laserem impulsowym, a także ciągłym o małej lub średniej mocy wymaga nadmuchu gazu ochronnego wzdłuż osi wiązki prowadzonej w obszar spawania.” , natomiast powinno być napisane: <i>Spawanie laserem impulsowym, a także ciągłym o małej lub średniej mocy, wymaga nadmuchu gazu ochronnego w obszar spawania wzdłuż osi wiązki laserowej.</i>
43	6	Jest napisane: „Wnioski wynikające z wykonanego przeglądu literatury oraz istniejące trendy przemysłowe i kierunki zastosowań świec zapłonowych, a także wykonane wstępne badania własne – laboratoryjne oraz doświadczalne (przemysłowe) posłużyły do sformułowania koncepcji niniejszej rozprawy doktorskiej – przedstawionej w rozdziale 3.” , natomiast powinno być napisane: <i>Wnioski wynikające z przeprowadzonego przeglądu literatury oraz analiza istniejących trendów przemysłowych i kierunków zastosowań świec zapłonowych, a także wykonane wstępne badania własne – laboratoryjne oraz doświadczalne (przemysłowe) posłużyły do sformułowania koncepcji niniejszej rozprawy doktorskiej – przedstawionej w rozdziale 3.</i>
43	9	Jest napisane: „Z przeprowadzonej analizy literaturowej wynika także, że szczegóły laserowego mikrosparwania materiałów takich jak Ir i Pt ze względów komercyjnych jest utajnione, dlatego warto się zająć tym zagadnieniem i badać je.” , natomiast powinno być napisane: <i>Z przeprowadzonej analizy literaturowej wynika także, że szczegóły dotyczące laserowego mikrosparwania materiałów takich jak Ir i Pt ze względów komercyjnych są utajnione, dlatego celowe jest badanie tego zagadnienia.</i>
47	6	Jest napisane: „Ze względu na wysokie koszty wykonania nakładek irydowych lub platynowych, a także

		<i>konieczności wykonania licznych prób, w celu uzyskania niezawodnego połączenia, model teoretyczny procesu spawania jest użytecznym i jednocześnie obniżającym koszty narzędziem, dającym wskazówki do poprawnego doboru parametrów procesu.</i> , natomiast powinno być napisane: <i>Ze względu na wysokie koszty wykonania nakładek irydowych lub platynowych, a także konieczność wykonania licznych prób doświadczalnych, w celu uzyskania niezawodnego połączenia celowe jest wykorzystanie teoretycznego modelu procesu spawania. Modelowanie jest użytecznym i obniżającym koszty narzędziem, dającym wskazówki do poprawnego doboru parametrów procesu.</i>
49	7	Jest napisane: „ <i>Model oddziaływania wiązki laserowej z powierzchnią próbki, z uwzględnieniem procesu topnienia i krzepnięcia, składa się z równań różniczkowych Furier-Kirchoff'a, Navier-Stokes'a dla konwekcji w strefie przetopionej oraz równań turbulencji K-ε.</i> ” , natomiast powinno być napisane: <i>Model oddziaływania wiązki laserowej z powierzchnią próbki, z uwzględnieniem procesu topnienia i krzepnięcia, opisany jest równaniami różniczkowymi Fouriera-Kirchoff'a, Naviera-Stokes'a dla konwekcji w strefie przetopionej oraz równań turbulencji K-ε.</i>
60	31	Jest napisane: „ <i>Wykonane mikrospawanie zostało podzielone na dwa warianty.</i> ” , natomiast powinno być napisane: <i>Mikrospawanie zrealizowano według dwu wariantów.</i>
64	13	Jest napisane: „ <i>Mając na uwadze wysokie koszty jednostkowe nakładek, wstępny dobór parametrów spawania określono na podstawie analizy literaturowej oraz wykonanych badań modelowych symulujących proces spawania.</i> ” , natomiast powinno być napisane: <i>Mając na uwadze wysokie koszty jednostkowe nakładek, wstępnego doboru parametrów spawania dokonano na podstawie analizy literaturowej oraz wykonanych badań modelowych symulujących proces spawania.</i>
117	1	Jest napisane: „ <i>Dla badanych próbek wykonano również badania mikroskopowe mające na celu identyfikację stanu powierzchni nakładek i elektrod po przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych.</i> ” , natomiast powinno być napisane: <i>Wykonano również badania mikroskopowe próbek mające na celu identyfikację stanu powierzchni nakładek i elektrod po przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych.</i>
126	2	Jest napisane: „ <i>Przeprowadzenie badań eksploatacyjnych prowadzono zgodnie z metodologią przyjętą podczas badań laboratoryjnych.</i> ” , natomiast powinno być napisane: <i>Badania eksploatacyjne prowadzono zgodnie z metodologią przyjętą podczas badań laboratoryjnych.</i>
135	12	Jest napisane: „ <i>Badania eksploatacyjne pozwoliły potwierdzić wyniki badań laboratoryjnych, iż opracowywana technologia spawania nakładek na elektrody świec zapłonowych zwiększy ich trwałość, co przynosi oczekiwane rezultaty.</i> ” , natomiast powinno być napisane: <i>Badania eksploatacyjne potwierdziły wyniki badań laboratoryjnych. Opracowana technologia spawania nakładek na elektrody świec zapłonowych zwiększyła ich trwałość.</i>
136	6	Jest napisane: „ <i>Nieosiągnięcie takiej trwałości przez świece zapłonowe eliminowało je z chęci kolejnego zakupu przez oczyszczalnię ścieków, co wpływało negatywnie na potencjalne zyski ze sprzedaży przez producenta (Zakłady Precyzyjne ISKRA Sp. z o.o.).</i> ” , natomiast powinno być napisane: <i>Nieosiągnięcie wymaganej trwałości przez świece zapłonowe powodowało brak zainteresowania oczyszczalni ścieków zakupem kolejnej partii, co wpływało negatywnie na potencjalne zyski producenta świec (Zakłady Precyzyjne ISKRA Sp. z o.o.).</i>
136	16	Jest napisane: „ <i>Powoduje to także zwiększenie zainteresowania ze strony potencjalnych nabywców i pomimo zwiększenia ceny jednostkowej pojedynczej świecy rekompensują się one poprzez dłuższą niezawodną pracę.</i> ” , natomiast powinno być napisane: <i>Powoduje to także zwiększenie zainteresowania ze strony potencjalnych nabywców, dla których wyższa cena jednostkowa pojedynczej świecy rekompensowana jest dłuższą niezawodną pracą.</i>

- Sformułowania o charakterze żargonowym:

str. 15: „*materiałów różnoimiennych*”; str. 33: „*materiałów jednoimiennych, ale bardzo często materiałów różnoimiennych*”

str. 19, str.20: „*(świeca może szybko zostać) zarzucona*”

str. 20: „*Słabe dociągnięcie świecy...*”

str. 41: „*Rysunek 2.17. Schemat ogniskowania wiązki laserowej o rozkładzie Gaussa za pomocą prostej soczewki [43].*” – co to znaczy „*prosta soczewka*”?

str. 51: Laser pracuje w „reżimie impulsowym” – lepiej: w trybie impulsowym.

str. 61: ...stanowiska do mikrospawania na bazie lasera...; poprawnie: stanowiska do mikrospawania wyposażonego w laser...

- Autor pracy nie jest w przyjaźni z zasadami interpunkcji – brak przecinków w ponad 60 miejscach nie ułatwia czytania tekstu, podobnie, jak co najmniej 12 przecinków zbędnych.

4. Ocena poziomu redakcyjnego rozprawy

Praca zredagowana jest przejrzysto i ma logiczną strukturę rozdziałów. Merytoryczna część pracy zawarta jest w 7 rozdziałach. Tekst uzupełniony został spisem literatury, spisem rysunków oraz tabel. Treść poszczególnych rozdziałów odzwierciedla logiczny ciąg rozprawy. Rozprawa jest trafnie zilustrowana 132 rysunkami, z których 85 to bardzo dobrej jakości zdjęcia mikroskopowe, oraz 18 tabelami. Język pracy zakłócony jest jednakże skłonnością autora do budowania bardzo długich, złożonych zdań, pewnych zawiłości i wynikających stąd błędów stylistycznych (*uwagi w p. 3 recenzji*). Od strony techniczno – edytorskiej praca przygotowana jest starannie. Pewne uwagi dotyczą rysunków:

Rys. 2.5., Rys.2.7, Rys.2.8 – opisy osi oraz na rysunku powinny być w języku polskim, a nie angielskim;

Rys. 2.14 – jakość nieakceptowalna

Rys. 4.11 – powinny być pokazane powiększone fragmenty elektrod

Zdjęcia obrabiarek Rys. 4.7. oraz stanowiska Rys. 6.1. przedstawione w takim powiększeniu są zbędne.

Rys. 5.1., 5.2., 6.4., 6.8. nic nie wnoszą do pracy

Powiększenie opisów na rysunkach (np.: 5.30, 6.2.,) oraz na wykresach w Tabeli. 6.1. zdecydowanie zwiększyłyby ich czytelność, zwłaszcza, że prezentują one wyniki własnych badań autora.

5. Ocena końcowa pracy, podsumowanie i wnioski

Recenzowaną rozprawę, niezależnie od przedstawionych powyżej uwag krytycznych i dyskusyjnych oraz zauważonych błędów, szczególnie językowych, oceniam bardzo dobrze. Tematyka pracy jest dobrze usytuowana w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna. Zawiera w sobie także elementy Inżynierii materiałowej oraz Techniki laserowej, wskazujące na jej interdyscyplinarny charakter. Recenzowana praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i jest znaczącym, własnym wkładem Doktoranta w badania dotyczące wykorzystania w konstrukcji urządzeń technologii mikrospawania laserowego, poprawiającego ich właściwości użytkowe. W omawianym przypadku dotyczy to świecy zapłonowej silnika spalinowego. Doktorant poprawnie zdefiniował problem naukowy, postawił tezę, która w pełni została udowodniona. Wykazał, że przemyślane wykorzystanie technologii spawania laserowego może być z sukcesem zastosowane do dołączania nakładek z materiałów trudno topliwych (Ir, Pt-Ir) do elektrod świecy zapłonowej. Na szczególne podkreślenie zasługuje wdrożenie wyników pracy doktorskiej mgr inż. Szymona Tofila do praktyki przemysłowej.

Za najważniejsze osiągnięcia naukowe Doktoranta uważam:

- Badania symulacyjne procesu spawania laserowego przeprowadzone na modelu dobrze odzwierciedlającym rzeczywistą geometrię spawanych elementów, z uwzględnieniem najważniejszych zjawisk występujących w procesie: transportu ciepła, przemiany fazowej i konwekcyjnego ruchu masy w przetopionym obszarze,
- Opracowanie technologii laserowego spawania nakładek na elektrody świecy zapłonowej, w tym wykazanie przydatności wstępnego podgrzewania elektrod dla zapewnienia dobrych wyników mikrospawania,
- Zweryfikowanie laboratoryjne jakości i trwałości świec z nakładkami spawanymi według opracowanej technologii,
- Bardzo dobre wyniki przeprowadzonych badań eksploatacyjnych świec, z elektrodami z nakładkami spawanymi laserowo przez Doktoranta, w rzeczywistych warunkach przemysłowych i wykazanie ponad dwukrotnego wzrostu trwałości świec podczas pracy w silniku zasilanym biogazem.
- Zaprojektowanie i wykonanie oprzyrządowania umożliwiającego realizację laserowego mikrospawania nakładek,
- Zaprojektowanie i wykonanie stanowiska laboratoryjnego do badania trwałości świec, które w dużej mierze odzwierciedlało rzeczywiste warunki pracy w silniku.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska **mgr inż. Szymona Tofila** p.t. „*Badanie trwałości laserowo spawanych nakładek na elektrody świec zapłonowych silników zasilanych paliwami gazowymi*” **spełnia z wyraźnym nadmiarem** wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, nie wymaga uzupełnień ani poprawek. Stosownie do przepisów ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm., Dz.U. z 2017, poz. 1789) wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.