

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

**RECENZJA rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Dywel**  
**pt. *Wpływ parametrów mikroobróbki laserowej na mikrostrukturę oraz***  
***właściwości użytkowe wybranych gatunków stali i stopu aluminium***

Promotor pracy: **dr hab. inż. Łukasz Skowroński, prof. PBS**

**Podstawa opracowania:** Uchwała nr 2/11/2023/2024 z dnia 7 listopada 2023 roku Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich oraz pismo nr 3/RNCS.520.1.2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna prof. dr hab. inż. Dariusza Borońskiego z dnia 10 listopada 2023 roku.

## **1. Uzasadnienie podjętego problemu**

Obróbka laserowa materiałów stanowi jedną z najbardziej zaawansowanych metod inżynierii powierzchni. Technologia ta znajduje zastosowanie w różnych sektorach przemysłu: w automatyce, lotnictwie, motoryzacji, medycynie i optoelektronice. Jedną z kluczowych zalet obróbki laserowej jest ograniczenie do minimum uszkodzeń materiału obrabianego oraz szybkość i efektywność procesu, przekładające się na obniżenie kosztów produkcji. Ponadto obróbka laserowa pozwala na realizację skomplikowanych wzorów i detali, niejednokrotnie niemożliwych do wykonania przy użyciu konwencjonalnych metod modyfikacji powierzchni. Technologia ta stale się rozwija w zakresie źródeł laserowych o różnej długości fali. Jedną z wiodących metod laserowych modyfikacji powierzchni metali, materiałów ceramicznych oraz polimerów stała się mikroobróbka laserowa, mająca wpływ na poprawę właściwości optycznych, mechanicznych, tribologicznych i korozyjnych. Kluczowe dla dalszego rozwoju tej technologii jest znajomość oddziaływania promieniowania laserowego na materiały oraz

określenie wpływu parametrów technologicznych na właściwości użytkowe zmodyfikowanych warstw wierzchnich. Mikroobróbka laserowa umożliwia bardzo precyzyjne kształtowanie powierzchni, nieosiągalne dla konwencjonalnych technik obróbki. Mikroobróbka laserowa ogranicza także wpływ ciepła, co znacząco redukuje ryzyko uszkodzenia termicznego obrabianych materiałów. Dzięki temu, że jest metodą bezkontaktową, eliminuje możliwość mechanicznego uszkodzenia delikatnych elementów. Ponadto umożliwia precyzyjne - lokalne modyfikowanie właściwości materiałów, takich jak twardość, właściwości tribologiczne czy przewodność, otwierając nowe możliwości w projektowaniu zaawansowanych materiałów funkcjonalnych.

Biorąc pod uwagę znaczenie i potencjalny zakres problematyki podjętej w pracy przez mgra inż. Piotra Dywel pt. *„Wpływ parametrów mikroobróbki laserowej na mikrostrukturę oraz właściwości użytkowe wybranych gatunków stali i stopu aluminium”*, uważam wybór tematu pracy doktorskiej za bardzo trafny i uzasadniony. Recenzowana praca mieści się w dyscyplinie naukowej **Inżynieria mechaniczna** i dotyczy mikroobróbki laserowej - teksturowania powierzchni wybranych stali i stopu aluminium oraz jej wpływu na właściwości eksploatacyjne.

## 2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Dywel przedstawiona jest na 120 stronach i zawiera różnorodny materiał ilustracyjny w postaci 47 rysunków, fotografii i wykresów oraz 15 tabel. Praca poprzedzona jest wstępem, następnie zawiera 8 rozdziałów merytorycznych, spis cytowanej bibliografii, w której zamieszczono 200 pozycji literaturowych, w tym 2 współautorskie Doktoranta. Znaczną część cytowanych pozycji literaturowych stanowią publikacje wydane w ciągu ostatnich 15 lat. Rozprawa zakończona jest streszczeniem w języku polskim i angielskim. Praca napisana jest w układzie klasycznym, tzn. została podzielona na dwie zasadnicze części: teoretyczną oraz doświadczalną. Część teoretyczna wraz z wstępem obejmuje 3 rozdziały, natomiast badania eksperymentalne zawierające opis zrealizowanych badań wraz z dyskusją wyników kolejnych 5. W pracy zamieszczono ponadto spis treści. Zabrakło spisu ważniejszych skrótów i oznaczeń, co na pewno przyczyniłoby się do lepszego czytania pracy. Część związana z wprowadzeniem literaturowym (rozdziały 1-3) stanowi ok. 30 % tekstu, resztę stanowią rozdziały związane z badaniami własnymi Doktoranta.

Mgr inż. Piotr Dywel podjął się w pracy problematyki modyfikacji warstwy wierzchniej poprzez mikroobróbkę laserową 3 gatunków stali i 1 stopu aluminium oraz oceny ich właściwości eksploatacyjnych poprzez wykonane badania właściwości mechanicznych, optycznych. Tytuł recenzowanej rozprawy *„Wpływ parametrów mikroobróbki laserowej na mikrostrukturę oraz właściwości użytkowe wybranych gatunków stali i stopu aluminium”* koresponduje z treścią zawartą w pracy. Rysunki oraz tabele zamieszczone w pracy wykonane są starannie i przejrzysto. Pod względem formalnym rozprawa została opracowana poprawnie, jej struktura odpowiada przyjętym zasadom, ale zabrakło według mnie wyraźnego określenia celu i zakresu pracy oraz przedstawienia w graficzny sposób

jej planu badań. Treści zawarte w poszczególnych rozdziałach zostały rozmieszczone zgodnie z postawioną, według mnie nadmiernie rozbudowaną hipotezą badawczą.

### 3. Ocena rozprawy doktorskiej

Obróbka laserowa charakteryzuje się wysoką efektywnością energetyczną, precyzją i możliwością automatyzacji. Mikroobróbka laserowa służy do precyzyjnej modyfikacji materiałów w szerokim spektrum zastosowań w wielu gałęziach przemysłu. Wynika to z jej wysokiej precyzji oraz minimalnej ingerencji w strukturę materiału. Recenzowana praca ukierunkowana jest na problematykę z zakresu wytwarzania i oceny właściwości użytkowych wybranych gatunków stali i stopu aluminium. Tematyka niniejszej rozprawy ma charakter interdyscyplinarny, jest nowoczesna, aktualna i potrzebna. Układ pracy jest raczej prawidłowy i zgodny z zasadami twórczości naukowej. Po wstępie przedstawiono przegląd literatury wraz z analizą aktualnego stanu wiedzy. Pozostałą część dysertacji stanowią badania własne. Praca napisana jest poprawną polszczyzną, a najważniejsze zauważone niezręczności w tym pojęciowe, zostaną przedstawione w części *Uwagi i Wątpliwości*. Wykaz literatury obejmuje najnowsze badania i stan wiedzy związany z tematem pracy.

We wstępie rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotr Dywel koncentruje się na znaczeniu i możliwościach laserowej modyfikacji powierzchni różnych materiałów. Autor podkreśla kluczowe zalety tej technologii w tym - bezstykowość, precyzję, szybkość i możliwość kontroli procesu.

Doktorant przedstawił cel pracy jako:

- zbadanie wpływu parametrów laserowej modyfikacji powierzchni wybranych podłoży (tj. szybkość skanowania oraz częstotliwość pulsacji) na zmiany struktury fizyko-chemicznej w sferze bezpośredniego oddziaływania promieniowania oraz w sferze wpływu efektów termicznych uwzględniając określenie właściwości użytkowych wytworzonych warstw.

Jako zakres pracy wskazał:

- określenie mikrostruktury i właściwości mikromechanicznych warstwy wierzchniej powszechnie stosowanej stali AISI 304, 316 poddanej mikroobróbce laserowej,
- ocenę topografii powierzchni oraz składu fazowego warstwy wierzchniej stali dwufazowej - duplex (1.4410) poddanej laserowej strukturyzacji,
- ocenę mikrostruktury oraz właściwości optycznych stopu aluminium (PA4) poddanego laserowej mikroobróbce.

Doktorant sformułował w nim także następującą tezę pracy:

*„Wiele prac poświęconych jest wyłącznie analizie geometrii zmian towarzyszących modyfikacji różnorodnych materiałów nie uwzględniając zmian właściwości fizykochemicznych powierzchni zachodzących w strefie mającej bezpośredni kontakt*

*z promieniowaniem laserowym. Zrozumienie natury lokalnych interakcji promieniowania laserowego z powierzchnią obrabianego materiału umożliwi optymalizację procesu technologicznego metod mikroobróbki laserowej wskazując jednoznacznie na jej aplikacje. Tym samym pozwoli wyeksponować zalety oraz wskazać na istotne ograniczenia w odniesieniu do danych technologii, co może przełożyć się na aspekt ekonomiczny stosowanych rozwiązań.”*

Cele pracy zostały sformułowane niezbyt jasno, ze względu na różne rodzaje badań wykonanych dla wybranych stali i stopu aluminium. Wytyczone cele pracy można podzielić na:

- technologiczny, dotyczący dobrania parametrów mikroobróbki laserowej powierzchni,
- eksploatacyjny, dotyczący określenia wpływu mikroobróbki laserowej oraz jej parametrów na właściwości użytkowe wybranych stali i stopu aluminium.

Pierwsza część pracy - rozdział 2. to część teoretyczna, w której zostały zaprezentowane zagadnienia z zakresu podstaw oddziaływania promieniowania laserowego z materiałem, z uwzględnieniem mechanizmu absorpcji promieniowania laserowego oraz podziału technologii laserowych modyfikacji powierzchni oraz ich aplikacji. Doktorant dokonał także klasyfikacji źródeł promieniowania laserowego wraz z ich zastosowaniami. Informacje te istotne są dla dalszych rozważań prowadzonych w dysertacji. Ten rozdział stanowi teoretyczne podstawy dla dalszych rozważań na temat technologii laserowych i technik laserowej modyfikacji powierzchni, wskazując na ich złożoność i interdyscyplinarny charakter.

Rozdział 3. przedstawia ogólną charakterystykę badanych materiałów, w tym stali AISI 304 i 316, stali dwufazowej typu duplex 1.4410 oraz stopu aluminium PA4. Doktorant dokonał klasyfikacji i określił właściwości tych materiałów, ze wskazaniem ich zastosowań przemysłowych. Rozdział ten stanowi podstawę teoretyczną do zrozumienia wpływu laserowej modyfikacji powierzchni na właściwości badanych materiałów, co jest kluczowe dla dalszych badań eksperymentalnych i potencjalnych aplikacji przemysłowych. Treści zawarte w tej części pracy wskazują na dobrą znajomość literatury przedmiotu Doktoranta.

Druga część pracy jest częścią eksperymentalną, w której prezentowany jest materiał z przeprowadzonych badań. Doktorant, posiadając wiedzę teoretyczną zrealizował zadania wynikające z programu pracy, chociaż według mnie zabrakło wyeksponowania programu badań w pracy np.: w postaci graficznej.

W rozdziale 4. doktorant przedstawił techniki badawcze wykorzystane do analizy mikrostruktury, właściwości mikromechanicznych i topografii powierzchni stali nierdzewnych AISI 304 i 316, stali dwufazowej typu duplex oraz stopu aluminium PA4 po obróbce laserowej. Określił wpływ różnych parametrów procesów laserowych, na charakterystykę powierzchni, mikrostrukturę i właściwości mechaniczne. Doktorant, w celu oceny wpływu modyfikacji mikroobróbki laserowej do analizy mikrostruktury, właściwości mechanicznych i topografii powierzchni materiałów po obróbce laserowej,

wykorzystał techniki takie jak: laserowa mikroskopia konfokalna (CLSM), dyfrakcja rentgenowska (XRD) i nanoindentacja.

Doktorant w rozdziale 5. zaprezentował wyniki eksperymentalnych badań dotyczących wpływu parametrów procesu mikroobróbki laserowej na mikrostrukturę oraz właściwości użytkowe wybranych gatunków stali (AISI 304, 316, duplex 1.4410) oraz stopu aluminium (PA4). Analiza koncentrowała się wokół określenia wpływu parametrów mikroobróbki na właściwości zmodyfikowanych warstw. Doktorant wykazał, że dobór parametrów procesu laserowej mikroobróbki ma kluczowe znaczenie dla uzyskiwanych właściwości fizykochemicznych warstw.

W rozdziale 6. doktorant dokonał podsumowania i sformułował wnioski końcowe. Wyniki eksperymentalne laserowej modyfikacji powierzchni stali, takich jak: AISI 304, 316, stal dwufazowa (duplex 1.4410) oraz stop aluminium PA4 wskazały, że:

- Konieczny jest dobór odpowiednich parametrów technologicznych procesu laserowej mikroobróbki w celu optymalizacji właściwości fizykochemicznych.
- Istnieje możliwość wykorzystania modyfikacji laserowej w celu poprawy efektywności odbicia światła w ogniwach słonecznych.

Ten rozdział pracy koncentruje się na syntezie i zastosowaniach praktycznych wyników badań, pokazując, jak dokładne dostosowanie parametrów procesu laserowej mikroobróbki może wpłynąć na poprawę właściwości wybranych materiałów metalowych. Doktorant podkreślił znaczenie tych badań dla przemysłu i technologii, wskazując na nowe możliwości w zakresie inżynierii powierzchni i aplikacji materiałowych.

Praca zakończona jest literaturą, spisami rysunków, tabel oraz streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim.

Do mocnych stron pracy i jednocześnie osiągnięć własnych doktoranta należy zaliczyć:

- Interdyscyplinarność pracy, gdyż łączy ona wiedzę z różnych dziedzin, takich jak fizyka laserów, inżynieria materiałowa, inżynieria mechaniczna, co wskazuje na jej kompleksowe i wieloaspektowe podejście doktoranta do problemu.
- Aktualne potrzeby przemysłowe wskazują na potrzebę realizacji badań w zakresie laserowej modyfikacji powierzchni.
- Podsumowanie pracy, zawierające wnioski i zalecenia dla przemysłu i dalszych badań, podnosi jej wartość praktyczną i naukową.

#### 4. Uwagi i wątpliwości

Podczas zapoznawania się z treścią rozprawy zrodziły się pewne wątpliwości. Dlatego proszę o ustosunkowanie się do następujących pytań i zastrzeżeń:

- Zabrakło w pracy spisu skrótów i oznaczeń, co znacznie ułatwiłoby lekturę dysertacji.
- Zabrakło w analizie stanu wiedzy wyrażenia osobistego stosunku autora do uzyskanych informacji z danych literaturowych.
- Zaprezentowana we wstępie hipoteza badawcza jest zbyt obszerna, a realizację jej i celu pracy, niewątpliwie ułatwiłoby przedstawienie programu badań.
- Rysunki: 4 str. 17, 5 str. 22, 10 str. 41, 11 str. 43 są w języku angielskim, a nie jak całość rozprawy w języku polskim. Klasyfikacja technologii obróbki laserowej czy różne rodzaje obróbki laserowej mają przecież polskie odpowiedniki.
- Zbyt długie i złożone zdania mogą utrudniać zrozumienie tekstu oraz niezręczności językowe np. na stronie 3 czytamy: "W dzisiejszych czasach, z naukowego punktu widzenia, jednym z większych wyzwań procesu mikroobróbki laserowej jest poznanie i zrozumienie natury interakcji promieniowania laserowego z powierzchnią obrabianego materiału oraz zbadanie wpływu parametrów procesu technologicznego na właściwości fizykochemiczne zmodyfikowanych warstw." Można było to zapisać w krótszych 2 zdaniach np.: „W dzisiejszych czasach jednym z głównych wyzwań jest zrozumienie interakcji promieniowania laserowego z materiałem. Kluczowe jest również zbadanie, jak parametry procesu wpływają na właściwości zmodyfikowanych warstw."
- Nie wyjaśniono, dlaczego wykorzystano inne techniki badawcze dla wybranych stali po mikroobróbce laserowej i dla stopu aluminium. Spowodowało to znaczące ograniczenia w interpretacji wyników.
- W metodyce badawczej zabrakło szczegółowego omówienia ograniczeń wybranych metod pomiarowych, np. zakresu nanoindentacji i jej wpływu na ocenę właściwości mikromechanicznych. Warstwy po mikroobróbce laserowej powinny być badane na mikrotwardościomierzu, a nie z wykorzystaniem nanoindentacji (o czym świadczą zastosowane wartości siły obciążającej: 250, 500 i 1000 mN).
- Zalecenia dotyczące przyszłych badań, zawarte w podsumowaniu, nie uwzględniają konkretnych wyzwań technologicznych czy materiałowych.
- W podsumowaniu zabrakło dokładnego wyjaśnienia przyczyn uzyskania takich wyników i odniesienia ich do wyników uzyskanych przez innych badaczy.

Na podstawie sformułowań zawartych w pracy zakładam, że Autor w perspektywie przewiduje prowadzenie dalszych badań uzupełniających. Dlatego, pomimo powyższych uwag krytycznych, z całą pewnością stwierdzam, że doktorant wykonał pracę badawczą, która wymagała doświadczenia i samodyscypliny przy jej realizacji. Dysertacja dotyczy aktualnej wiedzy i w wielu miejscach wnosi nowe treści

o znaczących walorach poznawczych i użytkowych. Przedstawione uwagi nie podważają znaczenia merytorycznego przeprowadzonych badań i nie umniejszają wartości rozprawy.

#### 4. Wniosek końcowy

Podjęty przez Doktoranta temat jest ważny dla nauki w zakresie inżynierii powierzchni i eksploatacji materiałów inżynierskich. Recenzowana rozprawa posiada konstrukcję, typową dla prac naukowych bazujących na eksperymencie. Mgr inż. Piotr Dywel w rozprawie potwierdza znajomość literatury przedmiotu i problematyki dotyczącej technologii laserowej mikroobróbki powierzchni. Stwierdzam, że Doktorant wykonał pracę, przeprowadził eksperymenty naukowe, dokonał analizy uzyskanych wyników, wyciągnął syntetyczne wnioski oraz przedstawił perspektywy rozwoju tematyki. Tym samym potwierdził swoje doświadczenie praktyczne podczas realizacji zadań badawczych. Przedstawione powyżej moje uwagi krytyczne mają charakter wskazówek na przyszłość dla doktoranta, by większą uwagę przywiązywał do treści zawartych w publikacjach naukowych.

Po zapoznaniu się z dysertacją mgra inż. Piotra Dywel pt. ***Wpływ parametrów mikroobróbki laserowej na mikrostrukturę oraz właściwości użytkowe wybranych gatunków stali i stopu aluminium*** uważam, że spełnia ona wymagania stawiane przez wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.). Dlatego stawiam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich o dopuszczenie mgra inż. Piotra Dywel do publicznej obrony.

Kielce, 20 stycznia 2024 roku

*mmadej*