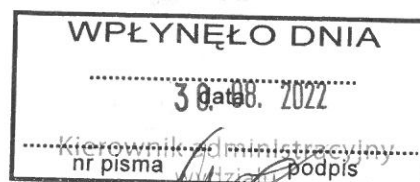


Dr hab. inż. Norbert Radek, prof. PŚk
Politechnika Świętokrzyska
Centrum Laserowych Technologii Metali
Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych
Systemów Laserowych
Al. 1000-lecia P. P. 7
25-314 Kielce

Kielce, 24.08.2022 r.



mgr Kamila Czerniak

RECENZJA rozprawy doktorskiej

***mgr inż. Mateusza Kuklińskiego pt. „Laserowe wspomaganie procesu toczenia stopu
niklowo-miedziowego z warstwą borowaną”***

Promotor pracy: **dr hab. inż. Damian Przystacki, prof. PP**

Promotor pomocniczy: **dr hab. inż. Aneta Bartkowska**

1. Podstawa formalna

Podstawą formalną wykonania recenzji było pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, z dnia 06.07.2022 r. o sygnaturze DIM.075.345.2022.

2. Tematyka rozprawy

Wykorzystanie promieniowania laserowego staje się obecnie coraz bardziej rozpowszechnione i różnorodne. Pomimo upływu ponad sześćdziesięciu lat od wynalezienia lasera, tempo badań w zakresie techniki laserowej oraz konstrukcji i produkcji urządzeń laserowych ustawicznie wzrasta. Rosnące zainteresowanie emitowanym przez laser promieniowaniem wynika z jego specyficznych, niezwykle użytecznych właściwości i możliwości budowy źródeł promieniowania o różnych parametrach takich jak: długość fali, mod poprzeczny wiązki, emitowana moc, energia impulsu, czas trwania impulsu, częstotliwość powtarzania impulsów itp.

Jednym z szybciej rozwijających się kierunków jest laserowa obróbka materiałów. Obejmuje ona następujące technologie: obróbkę ubytkową (cięcie, drażnienie otworów, znakowanie), obróbkę cieplną, spawanie, gięcie, kształtowanie oraz modyfikację warstwy wierzchniej. Zastosowanie laserów w obróbce materiałowej daje zasadnicze korzyści, do których można między innymi zaliczyć dużą powtarzalność wyników w związku z utrzymywaniem wąskiej

tolerancji dobranych parametrów, łatwość automatyzacji procesów technologicznych, możliwość koncentracji dużych gęstości mocy.

W obecnym czasie obserwuje się zainteresowanie technologiami niekonwencjonalnymi oraz wysoko-wydajnymi procesami obróbkowymi. Oprócz optymalizacji znanych już i stosowanych procesów efekty przynosi konsekwentne wdrażanie innowacyjnych technologii. Do takich technologii należy laserowe wspomaganie obróbki skrawaniem (ang. laser assisted machining - LAM). Badania nad technologią toczenia ze wspomaganiem laserowym prowadzone są na świecie od lat 80-tych XX wieku. W Polsce prace badawcze nad w/w technologią rozwijane są od końca lat 90-tych XX wieku w Politechnice Poznańskiej.

Tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Kuklińskiego dotyczy oceny skrawalności stopu niklowo-miedziowego (Monel 400) z warstwą borowaną laserowo podczas toczenia konwencjonalnego i ze wspomaganiem laserowym. W/w materiał ze względu na bardzo dobrą odporność korozyjną ma głównie zastosowanie w przemyśle stoczniowym i chemicznym oraz również w mniejszym stopniu w budownictwie i elektronice. Zastosowanie laserowego wspomaganie toczenia materiałów trudnoskrawalnych (np. warstwy borowanej laserowo) może przyczynić się do poprawy wskaźników skrawalności tj. parametrów chropowatości powierzchni, trwałości ostrza skrawającego, zmniejszenia wartości sił skrawania.

Dlatego też, wybór tematyki pracy uważam za celowy i szczególnie cenny zarówno w aspekcie naukowym, technologicznym, a przede wszystkim aplikacyjnym. Recenzowana praca doktorska wpisuje się w aktualne trendy rozwoju innowacyjnych niekonwencjonalnych technologii wytwarzania i wnosi wymierne korzyści poznawcze i użytkowe.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa mgr inż. Mateusza Kuklińskiego zawiera 98 stron podzielonych na 8 głównych rozdziałów (łącznie ze streszczeniami w języku polskim i języku angielskim), 62 rysunki oraz 10 tabel. Bibliografia zawiera 161 pozycji, w tym 8 publikacji z udziałem Autora, które zostały poprawnie dobrane do proponowanej tematyki rozprawy. Około 55 % cytowanych pozycji literaturowych jest opublikowana po 2010 roku, co stanowi bardzo dobry wskaźnik udziału publikacji „nowych” do ogólnej liczby pozycji przedstawionej w bibliografii. Znaczna część cytowanej literatury pochodzi z renomowanych czasopism o zasięgu międzynarodowym np. Metal Science and Heat Treatment, Optics and Laser Technology, Ceramics International, Surface and Coating Technology, Wear, Materials, International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Cytowana specjalistyczna

literatura z zakresu inżynierii powierzchni, wymiany ciepła, inżynierii materiałowej, technik wytwarzania, tribologii gwarantuje, że w pracy opisano aktualny stan wiedzy z kraju i zagranicy.

Przedstawiona rozprawa składa się z umieszczonego na początku wykazu oznaczeń i skrótów, streszczenia w języku polskim i angielskim, następnie ośmiu rozdziałów zasadniczych oraz zawartego na końcu wykazu literatury. Praca napisana jest w układzie klasycznym, z podziałem na część analizy literaturowej zagadnienia oraz część badań eksperymentalnych. Część związana z analizą literaturową stanowi około 48 % tekstu, pozostała część tekstu to przedstawione wyniki badań własnych Doktoranta.

Tytuł rozprawy „*Laserowe wspomaganie procesu toczenia stopu niklowo-miedziowego z warstwą borowaną*” został sformułowany poprawnie i odpowiada zawartości pracy.

W rozdziale 1 pt. *Wprowadzenie* Autor uzasadnia celowość podjęcia tematu pracy oraz przedstawia potencjalne zastosowania stopu Ni-Cu wraz z jego główną wadą (niska twardość). W celu podniesienia twardości w/w stopu proponuje zastosowanie metody laserowego stopowania borem. Wskazuje, że jedną z technologii, która może poprawić wskaźniki skrawalności stopu niklowo-miedziowego z warstwą borowaną jest zastosowanie laserowego wspomaganie toczenia.

W rozdziale 2 pt. *Analiza stanu zagadnienia* Doktorant dokonuje ogólnej charakterystyki i właściwości stopu Monel 400, skupiając się na jego budowie fazowej oraz składzie chemicznym, z których wynikają potencjalne właściwości użytkowe w/w stopu. Ponadto przedstawia zastosowanie stopu niklowo-miedziowego w różnych gałęziach przemysłu. Dużo uwagi poświęca pracom dotyczącym borowania stopów niklu i stopów niklowo-miedziowych. Autor syntetycznie opisuje metody chemiczne i fizyczne borowania powierzchni metali i ich podział. Omawia dwie metody obróbki cieplno-chemicznej (nawęglanie i azotowanie), które nie są efektywne w polepszeniu właściwości warstwy wierzchniej niklu i jego stopów. Doktorant przytacza prace odwołujące się do pozytywnych efektów zastosowania borowania powierzchni niklu i jego stopów (w szczególności nowoczesnych stopów żarowytrzymałych). Również uzasadnia zastosowanie borowania stopów Ni-Cu w celu poprawy ich właściwości eksploatacyjnych (głównie twardości i odporności na zużycie ścierne). Ponadto w rozdziale 2 Doktorant przedstawia w sposób przejrzysty i zwięzły proces laserowego stopowania borem. Dokonuje charakterystyki stopowania laserowego wraz z jego podziałem, prezentuje zalety i wady oraz główne parametry w/w technologii. Następnie omawia borowanie laserowe ze szczególnym

uwzględnieniem materiałów, które mogą podlegać w/w procesowi oraz prezentuje rodzaje laserów wykorzystywanych w tej technologii. Ponadto przedstawia korzyści jakie wynikają z borowania powierzchni różnych materiałów przy użyciu wiązki laserowej. W sposób syntetyczny dokonuje analizy borowania laserowego stopów niklu i stopów niklowo-miedziowych. Doktorant powołuje się na prace naukowe z których wynika, że laserowe stopowanie powierzchni metalowej borem powoduje powstawanie w warstwie wierzchniej twardych faz borków niklu, co powoduje wzrost twardości i w efekcie zwiększenie odporności na zużycie ściernie, erozyjne i kawitacyjne. Na uwagę zasługuje podrozdział 2.4, który stanowi kwintesencję rozdziału 2. Autor w/w podrozdziale opisuje w sposób uporządkowany obróbkę powierzchni wspomaganą wiązką laserową. Doktorant skupia się na jakości powierzchni (określaną parametrami chropowatości) po przetopieniu laserowym. Analizuje parametry Ra i Rz w zależności od zastosowanych technologii obróbczych. Następnie bardzo szczegółowo charakteryzuje obróbkę skrawaniem ze wspomaganie laserowym różnych grup materiałów. Powołuje się na artykuły, według których obróbka LAM zmniejsza parametry chropowatości powierzchni obrobionej, zużycie narzędzia skrawającego oraz siły skrawania. Podrozdział 2.4 kończy tematyka związana z wykorzystaniem technologii LAM do powierzchni napawanych. Rozdział 2 Autor zakończył podsumowaniem stanu wiedzy z analizy literatury i sformułował kierunki badań dotyczące wspomaganie laserowego obróbki skrawaniem stopu niklowo-miedziowego z warstwą borowaną laserowo.

W Mojej opinii rozdział 2 jest trochę „przegadany”. Dla lepszej przejrzystości powinien być podzielony na 2 rozdziały.

W rozdziale 3 pt. *Cele pracy i zakres badań* Doktorant formułuje dwa cele pracy, których realizacja pozwoli udowodnić postawione tezy (rozdział 4 pt. *Tezy pracy*). Pierwsza teza dotyczy, że w wyniku borowania laserowego stopu Monel 400 nastąpi wzrost twardości warstwy wierzchniej oraz poprawa odporności na zużycie ściernie. Natomiast druga teza brzmi, że zastosowanie technologii LAM przy skrawaniu stopu niklowo-miedziowego z warstwą borowaną laserowo zwiększy trwałość ostrza skrawającego oraz zmniejszy chropowatość powierzchni obrobionej.

W Mojej ocenie rozdziały 3 i 4 powinny być połączone w jeden rozdział. Ponadto brakuje zaplanowanego planu badań, w postaci schematu blokowego programu dysertacji. Mam pewną uwagę odnośnie podanych parametrów struktury geometrycznej powierzchni Ra i Rz. W/w parametry określają profil chropowatości powierzchni.

W rozdziale 5 pt. *Metodyka badań* Autor prezentuje materiał wybrany do wykonania próbek o powierzchniach płaskich i w kształcie wałka, sposób przygotowania materiału podłoża, wybór materiału powłokowego, materiały narzędziowe stosowane do skrawnia warstw borowanych, parametry stopowania laserowego borem oraz stanowiska badawcze z ich poszczególnymi elementami składowymi. Doktorant w sposób syntetyczny opisuje techniki badawcze i metodykę wykonania następujących pomiarów: głębokości przetopienia, mikrotwardości, siły skrawania, głębokości strefy zużycia, chropowatości powierzchni obrobionej oraz wskaźnika zużycia ostrza skrawającego. Ponadto Autor przedstawia sposób wykonania zglądów metalograficznych oraz metodykę badań obserwacji mikroskopowych przy użyciu mikroskopu optycznego. Dodatkowym wzmocnieniem rozdziału 5 jest opis statystycznej obróbki wyników badań.

W rozdziale 6 pt. *Warunki badań* Doktorant przedstawia w sposób uporządkowany zakres parametrów oraz cele szczegółowe badań eksperymentalnych. Autor w sposób przemyślany przyporządkowuje podrozdziałom w 7 części pracy poszczególne etapy badań.

W rozdziale 7 pt. *Wyniki i analiza badań* mgr inż. Mateusz Kukliński prezentuje wyniki badań doświadczalnych wraz z analizą uzyskanych rezultatów. Rozdział ten jest obszerny i stanowi ok. 21 % całości pracy. Wyniki badań eksperymentalnych Autor przedstawia w trzech podrozdziałach. Pierwszy podrozdział dotyczy badań próbek płaskich z warstwą borowaną laserowo, natomiast w drugim podrozdziale wykonano badania powierzchni walcowych stopowanych laserowo borem, które są przeznaczone do toczenia. Do oceny właściwości eksploatacyjnych warstw powierzchniowych powstałych podczas borowania laserowego stopu Monel 400 wykonano zestaw badań składających się: z obserwacji i analizy mikrostruktury, pomiarów głębokości przetopienia materiału i mikrotwardości oraz testów tribologicznych na zużycie ściernie. W trzecim podrozdziale skupiono się na ocenie wskaźników skrawalności podczas toczenia warstw borowanych laserowo. W pierwszym etapie przeprowadzono analizę zużycia dwóch rodzajów ostrzy skrawających po toczeniu konwencjonalnym. Następnie wykonano pomiary siły skrawania podczas toczenia konwencjonalnego i w warunkach LAM oraz pomiary chropowatości powierzchni po w/w obróbkach. Ponadto na uwagę zasługują przeprowadzone badania trwałości ostrza skrawającego podczas skrawania konwencjonalnego oraz laserowego wspomaganie skrawania. Należy podkreślić, że Doktorant właściwie wykorzystuje zastosowane w pracy techniki badawcze, które posłużyły do oceny wytworzonych warstw powierzchniowych.

Wyniki badań Autor bardzo starannie analizuje i interpretuje, co świadczy o Jego dużej wiedzy teoretycznej i praktycznej z zakresu technik wytwarzania, inżynierii powierzchni, inżynierii materiałowej oraz tribologii. Dodatkowo wyniki badań są dokumentowane w postaci dobrej jakości fotografii (np. obrazów mikrostruktury) oraz wykresów (np. pomiarów mikrotwardości Vickersa).

Zrealizowane przez Doktoranta badania stanowią cenne uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy i są ważnym osiągnięciem naukowym zawartym w niniejszej rozprawie.

W rozdziale 8 pt. *Wnioski końcowe* sformułowano wnioski podsumowujące uzyskane wyniki badań. Wnioski zostały podzielone na 3 grupy tj. poznawcze, użytkowe oraz do dalszych badań.

Za oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny *inżynieria mechaniczna* zaliczam:

- wybór materiału podstawowego oraz materiału stopującego,
- szeroki zakres badań eksperymentalnych warstw stopowanych laserowo,
- wnikliwą analizę uzyskanych wyników badań,
- możliwość zastosowania wytworzonych warstw powierzchniowych w przemyśle stoczniowym, chemicznym oraz energetycznym.

Do pewnych mankamentów występujących w pracy zaliczam:

- brak analiz mikrostruktur warstw powierzchniowych z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej z mikroanalizą rentgenowską (SEM-EDS),
- brak badań strukturalnych warstw borowanych laserowo metodą dyfrakcji rentgenowskiej,
- brak badań odporności korozyjnej wytworzonych warstw powierzchniowych.

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Kuklińskiego ma charakter doświadczalno-aplikacyjny. Uzyskane wyniki badań mogą zostać wdrożone do różnych gałęzi przemysłu. Opracowanie redakcyjne rozprawy jest na bardzo wysokim poziomie edycyjnym.

Rozprawę doktorską mgr inż. Mateusza Kuklińskiego oceniam bardzo wysoko i stwierdzam, że przedstawione wyniki badań poszerzają wiedzę w zakresie laserowego wspomaganego obróbki skrawaniem stopu niklowo-miedziowego z warstwą borowaną. Ponadto chciałbym podkreślić, że niniejsza rozprawa doktorska stanowi oryginalny wkład w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*, a szczególnie w rozwój wiedzy w zakresie technik wytwarzania, wymiany ciepła, inżynierii powierzchni oraz inżynierii materiałowej.

4. Uwagi krytyczne i błędy edytorskie

Rozpraw doktorska mgr inż. Mateusza Kuklińskiego zawiera pewne nieścisłości oraz błędy redakcyjne. Poniżej szczegółowa lista uwag.

1. str. 7 - gęstość Monelu 400 jest podana w jednostce [g/cm³], a powinna być w [g/cm³]. Ponadto, dlaczego Autor stosuje jednostkę spoza układu SI ?
2. str. 8 - Autor użył zwrotu: ... jest określany jako zadowalający ... Powinno być: ... jest określana jako zadowalająca ...
3. str. 15 - Autor użył zwrotu: ... przedstawiającym układ fazowy Ni-C ... Powinno być: ... przedstawiającym układ fazowy Ni-C ...
4. str. 27 - Autor użył zwrotu: ... nadmiar ciepła zostaje rozporowadzony... Powinno być: ... nadmiar ciepła zostaje rozprowadzony ...
5. str. 34 - Autor użył zwrotu: ... opisanym w [66]. Powinno być: ... opisanym w pracy [66].
6. str. 35 - Nieprecyzyjne określenie: ... średnicą plamki wiązki. Powinno być: ... średnicą wiązki laserowej.
7. str. 42 - Autor użył zwrotu: ... jest kilkukrotnie niższa [80]. Powinno być: ... jest kilkukrotnie niższa [80].
8. str. 42 - Nieprecyzyjne określenie: ... częstotliwości pulsów lasera. Powinno być: ... częstotliwości impulsów lasera.
9. str. 46 - Autor użył zwrotu: ... transfer ciepła wygenerowane ... Powinno być: ... transfer ciepła wygenerowany ...
10. str. 48 - Nieprecyzyjne określenie: ... parametrów struktury geometrycznej Ra i Rz powierzchni obrobionej ... Powinno być: ... parametrów profilu chropowatości Ra i Rz powierzchni obrobionej ...
11. str. 49 - Nieprecyzyjne określenie: ... w formie wałka ... Powinno być: ... w kształcie wałka ...
12. str. 51 - Proszę wyjaśnić stwierdzenie: Dla pozostałych próbek kolejnym etapem było pokrycie powierzchni powłokami pasty z borem o dwóch różnych grubościach, ...
13. str. 55 - rys. 36 jest mało kontrastowy.
14. str. 66 - Nieprecyzyjne określenie: ... wybranych substancji ... Powinno być: ... wybranych materiałów ...
15. str. 66 - Autor w opisie mikrostruktur powstałych po stopowaniu laserowym borem stopu Monel 400 wskazuje na występowanie w warstwie powierzchniowej borków niklu. Dotyczy to całej pracy. Czy były wykonywane badania dyfraktometryczne ?

16. str. 74 - Autor użył zwrotu: ... oraz h_{ef} równe ... Powinno być: ... oraz h_{ef} równe ...

17. str. 77 - Autor użył zwrotu: ... materiału podłożowego ... Powinno być: ... materiału podłoża ...

18. str. 83 - rys. 60 jest mało kontrastowy.

Uwagi krytyczne zawarte w tym punkcie recenzji nie obniżają wartości merytorycznej i ogólnej pozytywnej oceny rozprawy. Mają one charakter dyskusyjny i porządkowy, co powinno pomóc Autorowi podczas przygotowywania artykułów do czasopism naukowych.

W ramach dyskusji proszę, aby Doktorant ustosunkował się do poniższych pytań:

1. Na jakiej podstawie Autor określił parametry stopowania laserowego borem próbek płaskiej i walcowych? Czy przeprowadzono optymalizację procesu?
2. Jaka jest perspektywa wdrożenia do gospodarki stopu niklowo-miedziowego z warstwą borowaną laserowo?

5. Wniosek końcowy

Reasumując można stwierdzić, że Doktorant w pełni opanował techniki pomiarowe, przeprowadził szeroko zakrojone badania i uzyskał oryginalne wyniki zarówno o znaczeniu poznawczym, jak i przede wszystkim aplikacyjnym. Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Z lektury dysertacji wynika, że Autor posiada szeroką wiedzę w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna oraz potwierdza nabycie umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zamieszczone w niniejszej recenzji uwagi krytyczne mają w większości charakter dyskusyjny oraz odnoszą się do uchybień natury wydawniczej. Należy podkreślić, że nie rzutują one jednak istotnie na wysoki poziom naukowy rozprawy.

Dlatego stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca mgr inż. Mateusza Kuklińskiego pt. „Laserowe wspomaganie procesu toczenia stopu niklowo-miedziowego z warstwą borowaną” spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto dysertacja zasługuje na wyróżnienie, o co niniejszym wnioskuje. Za wyróżnieniem rozprawy przemawiają moim zdaniem bardzo dobrze przeprowadzone i udokumentowane badania eksperymentalne, uzyskane wartościowe wyniki i ich wnikliwe przeanalizowanie oraz duże znaczenie aplikacyjne uzyskanych rezultatów badań.

