

Gliwice, dnia 15.01.2020 r.

Dr hab. inż. Mirosław Bonek, prof. PŚ  
Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Śląska  
ul. Konarskiego 18a  
44-100 Gliwice

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Izabeli Pliszki pt.: „Wpływ modyfikacji laserowej na strukturę i właściwości wybranych powłok węglkowych nanoszonych elektroiskrowo”, wykonanej pod opieką promotora dr hab. inż. Norberta Radka, prof. PŚK oraz promotora pomocniczego dr hab. inż. Anety Gądek-Moszczak. Recenzja opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej prof. dr hab. inż. Jerzego Śładka na podstawie uchwały Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 13 grudnia 2019 roku.

### **1. Ocena oryginalności problematyki rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Izabeli Pliszki pt.: „Wpływ modyfikacji laserowej na strukturę i właściwości wybranych powłok węglkowych nanoszonych elektroiskrowo” stanowi ciekawy z punktu widzenia naukowego i poznawczego zakres badań, realizowanych od wielu lat w Katedrze Inżynierii Eksploatacji Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, dotyczących kształtowania własności powierzchniowych materiałów poprzez nanoszenie powłok obróbką elektroiskrową i laserową. Z całą pewnością można stwierdzić, że są to badania o dużej wartości naukowej, metodycznej i aplikacyjnej. Podjęta próba poznania wpływu modyfikacji laserowej na strukturę i właściwości wybranych powłok węglkowych nanoszonych elektroiskrowo ppzwala na opracowanie wielu nowych zależności i wniosków.

Generalnie, laserowe techniki wytwarzania, jak wynika z prognoz dotyczących czynników globalnego rozwoju gospodarczego, są najbardziej obiecującymi i efektywnymi w celu zapewnienia dalszego rozwoju w wielu gałęziach przemysłu, w których dominuje przetwórstwo materiałów. Uważa się, iż w przyszłości na rynku międzynarodowym

konkurencyjne będą tylko te gospodarki, w których technologie laserowe będą wykorzystywane w szerokim zakresie. Obecnie światowy przemysł już bardzo często wykorzystuje technologie laserowe, a najszersze zastosowanie przemysłowe w procesach laserowej obróbki materiałów mają obecnie lasery stałe z elementem czynnym krystalicznym – Nd:YAG oraz lasery gazowe – CO<sub>2</sub>. Badania prowadzone obecnie w kraju i zagranicą w zakresie przetapiania, stopowania i napawania laserowego, koncentrują się na obróbce różnych gatunków stali przy zastosowaniu laserów gazowych CO<sub>2</sub> i stałych, o pracy ciągłej i impulsowej. Dynamiczny rozwój technik oraz urządzeń laserowych spowodował wprowadzenie do przemysłu dużej liczby laserów, co stwarza możliwości dalszego rozwoju oraz znacznego rozszerzenia zastosowania technologii inżynierii powierzchni.

Poprzez zmianę parametrów procesu, takich jak moc lasera, średnica wiązki bądź szybkość skanowania, laser może wykonać wiele funkcji. Dzięki temu lasery mają szereg interesujących zastosowań w procesach wytwarzania oraz obróbki materiałów, takich jak cięcie, spawanie, szklwienie, stopowanie czy nakładanie powłok. Powierzchniowa obróbka laserowa jest nową technologią zmiany własności warstwy wierzchniej materiałów, bez istotnej zmiany własności ich rdzenia. W miarę wzrostu zapotrzebowania na nowe technologie, lasery znajdują zastosowanie w każdej gałęzi przemysłu i usług. Materiały stosowane w obróbce laserowej to stale i inne stopy żelaza (w tym odlewnicze), metale nieżelazne i ich stopy, papier, tektura, ceramika, drewno oraz tworzywa sztuczne.

Zasadniczym celem laserowego przetapiania warstw wierzchnich materiałów jest modyfikacja struktury i związanych z nią własności. Dzięki tworzeniu jednorodnej chemicznie, drobnokrystalicznej warstwy wierzchniej bez zmiany składu chemicznego materiału uzyskuje się zwiększenie odporności głównie na ścieranie i zmęczenie cieplne.

Własności wiązki laserowej w połączeniu z dokładnością pozycjonowania rzędu setnych części milimetra pozwalają na przeprowadzanie bardzo precyzyjnych procesów nakładania warstw wierzchnich, napraw, a nawet produkcji gotowych elementów. Ponieważ techniki bezpośredniego wytwarzania są nadal na etapie badawczym, szczególnym zainteresowaniem cieszą się także obecnie procesy regeneracji wykorzystujące szczególne własności promieniowania laserowego.

## **2. Ocena merytoryczna pracy i uwagi ogólne**

Wybór tematyki rozprawy dokonany przez mgr inż. Izabelę Pliszkę związanej z laserową obróbką powierzchniową, świadczy o dobrym przygotowaniu merytorycznym do podejmowania oryginalnych prac naukowo-badawczych oraz determinacji niezbędnej do

realizacji badań w zakresie inżynierii materiałowej, dodatkowo wspartej dużym doświadczeniem praktycznym w zakresie powłok węglkowych nanoszonych elektroiskrowo. Podjęcie współpracy naukowej Doktorantki z dr hab. inż. Norbertem Radkiem, prof. PŚK zaowocowało, ambitnym planem badawczym, zoptymalizowanym doborem metodyki badań oraz rzeczową analizą uzyskanych wyników.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Izabeli Pliszki posiada klasyczny układ, który w prawidłowy i czytelny sposób przedstawia wszystkie niezbędne jej aspekty i osiągnięcia. W pracy zaprezentowano zoptymalizowany, dobrej jakości materiał ilustracyjny w postaci wyników badań, przez co praca charakteryzuje się dobrym powiązaniem opisywanych zagadnień do zdjęć, wykresów i rysunków w nich przywoływanych. Praca liczy łącznie 187 stron, zawiera 3 rozdziały, spis rysunków i tabel oraz bibliografię. Spis literatury cytowanej w pracy obejmuje 121 pozycji w większości z uznanych międzynarodowych czasopism z czego 8 stanowi publikacje współautorskie Doktorantki.

We wprowadzeniu pracy Doktorantka przedstawia zagadnienia istotne z punktu widzenia projektowania własności warstwy wierzchniej, poprzez zastosowanie różnorodnych procesów technologicznych, a w szczególności skupia się na procesie elektroiskrowym.

W pierwszym, ponad 42 stronicowym rozdziale rozprawy, zawarto syntetyczne ujęcie opisu stanu zagadnień związanych z tematyką niniejszej pracy dotyczących przede wszystkim aspektów inżynierii powierzchni: charakterystyki warstwy wierzchniej materiału, procesu obróbki elektroiskrowej oraz procesu obróbki laserowej. W ramach tego rozdziału Doktorantka dokonała przeglądu literatury, w tym głównie zagranicznej dotyczącej opisu zjawisk towarzyszących tworzeniu powłok oraz sposobów charakteryzowania ich własności. Opisano szczegółowo wyniki badań dostępnych w literaturze. Taki przegląd współczesnej wiedzy w zakresie tematycznym pracy wpłynął na sformułowany w kolejnym rozdziale cel i zakres pracy.

W drugim rozdziale Autorka przedstawia następujące cele pracy w brzmieniu:

*Celem głównym* jest zbadanie wpływu parametrów obróbki laserowej na strukturę i wybrane właściwości eksploatacyjne powłok elektroiskrowych.

*Celem pomocniczym* jest opracowanie procesu wytwarzania elektrod kompozytowych z nanostrukturalnych proszków oraz poprawa własności eksploatacyjnych par kinematycznych i narzędzi, a zwłaszcza ich trwałości, zmniejszenia oporów tarcia oraz pracy przy wysokich obciążeniach.

*Celem naukowym* jest opracowanie modelu matematycznego procesu będącego wynikiem eksperymentu planowanego, zapewniającego optymalizację parametrów dla uzyskania

założonych cech powierzchni. Opracowany model może przyczynić się do rozszerzenia wiedzy w zakresie obszarów zastosowania tej obróbki.

W celu osiągnięcia postawionych celów Doktorantka dobrała poprawny ilościowo, odpowiednio wysokiej jakości zestaw narzędzi sprzętowych i badawczych oraz opracowała metodykę w celu ich realizacji. Informacje o metodyce oraz materiałach użytych do badań zawarte są na 6 stronach. Procedura badawcza obejmowała wykorzystanie dużej liczby narzędzi: mikroskopii świetlnej i skaningowej, spektroskopii EDS, rentgenowskiej analizy fazowej, badań struktury geometrycznej powierzchni, mikrotwardości, porowatości, przyczepności, badań korozyjnych oraz trybologicznych.

Niewątpliwie najciekawszą i najbardziej wartościową poznawczo częścią recenzowanej rozprawy jest opis wyników badań i ich omówienie. Doktorantka w swych badaniach wytwarzała elektrody dwoma różnymi metodami: metodą prasowania na gorąco oraz metodą impulsowo-plazmowego spiekania. Wytworzone w ten sposób materiały wykorzystane zostały do nanoszenia powłok elektroiskrowych poddanych laserowej modyfikacji. W celu ustalenia wpływu parametrów procesów technologicznych na własności powłoki zastosowano szereg technik badawczych pozwalających powiązać wpływ mocy wiązki lasera na własności warstwy wierzchniej.

Badania zostały zestawione w następujących grupach:

- opracowanie technologii wytwarzania elektrod do nakładania powłok - metodę PPS i metodę spiekania elektrod na gorąco,
- określenie wybranych właściwości fizyko-mechanicznych materiału podłoża,
- badanie wybranych właściwości fizyko-mechanicznych i użytkowych powłok elektroiskrowych przy zastosowaniu dwóch rodzajów wytworzonych elektrod,
- badanie wybranych właściwości fizyko-mechanicznych i użytkowych po modyfikacji powłok wiązką laserową przy różnych mocach lasera.

Dopełnieniem planu badawczego Doktorantki jest przedstawienie modelu, w oparciu o eksperyment planowany, umożliwiającego ocenę wpływu parametrów obróbki na wybrane własności eksploatacyjne.

Uzyskane wyniki badań oraz ich interpretacja pozwoliły na wyciągnięcie najważniejszych dla rozważanego zagadnienia będącego tematem niniejszej rozprawy wniosków:

1. Wiązką laserową można skutecznie modyfikować stan warstwy wierzchniej powłok elektroiskrowych i wpływać w ten sposób na ich właściwości użytkowe.

2. Zastosowanie obróbki laserowej do modyfikacji powłok węglkowych nakładanych elektroiskrowo podnosi niektóre właściwości eksploatacyjne powłok, a w szczególności zwiększa ich przyczepność oraz odporność korozyjną oraz zmniejsza porowatość i w niewielkim stopniu mikrotwardość.
3. Powłoki elektroiskrowe po obróbce laserowej posiadają wyższą odporność na zużycie ściernie niż powłoki bez tej obróbki.
4. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że obróbka laserowa w różnym stopniu wpływa na chropowatość powłok węglkowych. Chropowatość powłok elektroiskrowych po obróbce laserowej jest mniejsza lub większa w stosunku do chropowatości powłok bez tej obróbki.
5. W wyniku laserowego przetopienia powłok elektroiskrowych i następującego po nim krzepnięcia, skład chemiczny powłok uległ zmianie. Obróbka laserowa powoduje ujednorodnienie składu chemicznego, rozdrobnienie struktury oraz likwidację mikropęknięć i porów.
6. W ramach wykonanych badań modelowych uzyskano wyższe wartości współczynnika tarcia i wycieków niż w przypadku uszczelnień z pierścieniami z SiC. Podczas badań zauważono tendencje do zmniejszenia wycieku dla pierścieni po obróbce laserowej.
7. Na podstawie analizy wyników uzyskanych z eksperymentu projektowanego, stwierdzono występowanie statystycznie istotnych zależności pomiędzy parametrami obróbki (prędkość przesuwu próbki  $v$  i moc wiązki laserowej  $P$ ), a wybranymi właściwościami technologicznej warstwy powierzchniowej (chropowatość, intensywność zużycia, współczynnik tarcia oraz mikrotwardość).

Zawarte w rozdziale 3.2. podsumowanie, a także wnioski opracowane na podstawie otrzymanych wyników badań potwierdzają, że udowodniono cel pracy.

### **3. Uwagi szczegółowe**

Oczywiście, jak w każdej pracy są elementy, których korekta lub uzupełnienie może zwiększyć wartość edycyjną ocenianej pracy. Najczęściej są to drobne błędy edycyjne czy językowe, których doliczono się zaledwie kilkanaście w całej pracy. Ogólnie należy wysoko ocenić poziom edycyjny pracy.

Do uwag dyskusyjnych, które mogą stanowić wskazówki dla Autorki w jej dalszej pracy, należy zaliczyć niedosyt, jaki sprawia brak jasno postawionej tezy pracy, która podlegałaby weryfikacji we wnioskach końcowych. Zastosowanie w pracy podziału na rozdziały związane z opisem materiału, metodologią badawczą i zastosowanymi parametrami technologicznymi

oraz omówieniem uzyskanych wyników badań ułatwiłoby znacznie usystematyzowanie wniosków.

Doktorantka zastosowała dwie technologie wytwarzania elektrod – metoda prasowania na gorąco oraz metodę spiekania impulsowo-plazmowego co w spisie treści zostało przedstawione w sposób mylący. Pominięto również w spisie treści bibliografię.

Zgodnie z określonym celem głównym - badania polegały na określeniu wpływu parametrów obróbki laserowej na strukturę i wybrane własności eksploatacyjne. Zgodnie z przedstawionymi na stronach 65 i 120 parametrami obróbki laserowej jedynym elementem zmiennym jest moc lasera dla elektrod prasowanych na gorąco określona jako  $P = 20, 50, 60$  i  $70$  W, a dla elektrod wytworzonych metodą spiekania impulsowo-plazmowego wynosiła  $P = 20$  W. Można odnieść wrażenie pewnej nierównowagi w doborze parametrów eksperymentalnych. Zastosowanie podobnych mocy we wszystkich przypadkach pozwoliłoby wyciągnąć bardziej dokładne wnioski.

Proces przetapiania laserowego jest procesem bardzo dynamicznym powodującym gwałtowny przyrost temperatury. Materiał przechodzi w stan ciekły a następnie następuje szybkie jego krzepnięcie. Zagadnieniem do dalszych rozważań jest wpływ braku ochrony gazowej jeziora i możliwość powstawania w nim produktów korozji związanych z obecnością tlenu w sprężonym powietrzu zastosowanym w badaniach.

Ważnym aspektem pracy badawczej jest również obróbka statystyczna opracowywanych danych. Doktorantka nie zamieszcza na rysunkach przedstawiających grubość warstwy powierzchniowej (rys. 16, 17), ubytku masy kulki i pierścienia (rys. 53-55) oraz wyniki badania mikrotwardości (rys. 56), informacji o wartościach statystycznych wartości otrzymywanych wyników, zwłaszcza takich jak odchylenie standardowe. Ujęcie tabelaryczne prezentowanych wyników badań wraz ze statystycznym ich opracowaniem znacznie ułatwiłoby analizę danych.

Ciekawym zagadnieniem do dalszych rozważań mogłyby być również badania strefy przejściowej pomiędzy strefa przetopioną, a materiałem rodzimym oraz poznanie mechanizmów tworzenia się połączenia pomiędzy różnymi materiałami zastosowanymi na elektrody.

Biorąc pod uwagę, że zdecydowana większość w/w uwag do pracy ma charakter uzupełnienia lub wskazówki, której celem jest poprawa czytelności i poprawności interpretacji zawartych w niej informacji, można z całą stanowczością uznać, że nie wpływają one na bardzo dobrą ocenę pracy, zarówno pod względem merytorycznym, jak i poprawności językowej oraz edycyjnej.

#### 4. Uwagi końcowe

Zawarte w pracy podsumowanie w bezsprzeczny sposób pokazuje, że Doktorantka rozprawy biegle posługuje się specjalistycznym analitycznym językiem materiałoznawczym pozwalającym na prawidłową i rzeczową ocenę wyników badań i wiązaniu ich ze zjawiskami strukturalnymi jakie występują lub mogą wystąpić w analizowanych materiałach.

Mocną stroną rozprawy doktorskiej jest jej bardzo szeroki zakres wykonanych badań zmierzający do osiągnięcia celu pracy tj. określenia wpływu modyfikacji laserowej na strukturę i właściwości wybranych powłok węglkowych nanoszonych elektroiskrowo.

Praca stanowi cenny wkład w dyscyplinę naukową jaką jest inżynieria materiałowa zwłaszcza w obszarze inżynierii powierzchni. Autorka nie tylko przedstawiła wyniki badań, ale jak podkreślono powyżej wykonała ich analizę i właściwą interpretację.

Oceniając pracę warto także rozważyć aspekty praktyczne jakie wnosi rozprawa doktorska mgr inż. Izabeli Pliszki w poznanie wpływu modyfikacji laserowej na strukturę i właściwości wybranych powłok węglkowych nanoszonych elektroiskrowo. Warto zapewne prowadzić dalsze prace zmierzające do aplikacji tej innowacyjnej technologii na szeroka skalę.

Biorąc pod uwagę, że Doktorantka w niniejszej pracy doktorskiej wykazała się, że:

- jest bardzo dobrze zorientowana w poruszanej w literaturze problematyce dotyczącej inżynierii powierzchni, wykazując się erudycją i dobrym opanowaniem warsztatu naukowego w inżynierii materiałowej,
- pozyskała umiejętności stawiania i rozwiązywania problemów badawczych i właściwego doboru komplementarnego zestawu metod badawczych oraz ich pełnego opanowania praktycznego (pomimo wysokiego stopnia trudności),
- uzyskała wartościowe i oryginalne wyniki badań o istotnym znaczeniu poznawczym i o walorach aplikacyjnych,

stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Izabeli Pliszki pt.: „Wpływ modyfikacji laserowej na strukturę i właściwości wybranych powłok węglkowych nanoszonych elektroiskrowo” pełni warunki określone w art. 13 ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2016, poz. 882) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

