

ul. Borówkowa 24  
91-496 Łódź  
Politechnika Łódzka  
Wydział Mechaniczny  
Instytut Inżynierii Materiałowej

## Recenzja

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

Niniejszą opinię opracowałem w oparciu o decyzję Rady naukowej dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich z dnia 7 listopada 2023 roku powołującej mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Dywel pt.: „Wpływ parametrów mikroobróbki laserowej na mikrostrukturę oraz właściwości użytkowe wybranych gatunków stali i stopu aluminium”. O decyzji tej poinformował mnie Przewodniczący rady naukowej dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej prof. dr hab. inż. Dariusz Boroński pismem z dnia 10 listopada 2023 roku.

Recenzowana rozprawa podejmuje tematykę laserowej modyfikacji warstwy wierzchniej wybranych metalowych materiałów inżynierskich dla zmiany jej struktury i parametrów mechanicznych pod kątem doskonalenia cech funkcjonalnych. Modyfikacji i badaniom podlegały kwasoodporne stale austenityczne o symbolach 304 oraz 316 wg AISI, stal typu super Duplex o symbolu 1.4410 wg normy europejskiej 10088-1, a także stop aluminium z magnezem i krzemem o symbolu PA4 - 6082 wg PN-EN 573-3:2005 oraz PN-EN 573-1:2006. Przedmiotem badań efektów mikromodyfikacji laserowej były: dla austenitycznych stali kwasoodpornych 304 oraz 316 – mikrostruktura i morfologia (w tym topografia) warstwy wierzchniej, a także jej właściwości mikromechaniczne; dla stali typu super Duplex o symbolu 1.4410 – skład fazowy oraz morfologia/topografia warstwy wierzchniej; zaś dla stopu aluminium PA4 – mikrostruktura oraz morfologia/topografia warstwy wierzchniej, a także przede wszystkim właściwości optyczne zmodyfikowanej laserowo powierzchni. O ile w przypadku badań nad mikro modyfikacją laserową stali funkcja celu jest ogólnikowa i rozmyta, to badania nad laserową mikroobróbką powierzchniową stopu glinu PA4 są ściśle ukierunkowane na potencjalną, przyszłą aplikację w zastosowaniu do modyfikacji odbłyśników

w systemach ogniw fotowoltaicznych w celu znacznej poprawy ich odbicia dyfuzyjnego światła w zakresie widzialnym, ultrafioletu oraz bliskiej podczerwieni.

W recenzowanej rozprawie można wyodrębnić cztery jej części merytoryczne: wstęp (rozdział 1), przegląd stanu wiedzy z zakresu dysertacji (rozdziały 2 i 3), metodykę i wyniki badań (rozdziały 4-8) oraz podsumowanie (rozdział 9), a także spis literatury obejmujący 200 pozycji, spisy tabel i rysunków, oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. W rozprawie Doktorant nie sformułował syntetycznych wniosków końcowych, które stanowiłyby zwięzłe zapisany dowód postawionej tezy naukowej rozprawy. Niestandardowo tezę naukową zamieszczono we wstępie do rozprawy w rozbudowanej formie trzyzdaniowej. W ocenie recenzenta, tak sformułowana teza nie jest sensu stricto hipotezą naukową, a raczej postulatem potrzeby prowadzenia pewnego portfolio badań naukowo technologicznych oraz interpretacji ich wyników dla zdefiniowania korzyści oraz ograniczeń przy modyfikacji laserowej warstwy wierzchniej wybranych materiałów inżynierskich.

Przegląd stanu wiedzy z zakresu dysertacji obejmuje w rozdziale 2 syntetycznie opisane zagadnienia z zakresu fizyki absorpcji promieniowania laserowego z ciałem stałym, przegląd laserowych technologii modyfikacji powierzchni oraz ich zastosowań a także charakterystykę źródeł promieniowania wykorzystywanych w obróbce laserowej. W tym zakresie tematycznym doktorant wykazał wysokie kompetencje merytoryczne. Rozdział 3 zawiera strukturalną, technologiczną oraz aplikacyjną charakteryzację tworzyw metalowych poddanych laserowej modyfikacji. W rozdziale tym Doktorant odnosi się do licznych doniesień z literatury światowej o charakterze przyczynkowym przez co ten fragment rozprawy zawiera kilka nieścisłości i błędów terminologicznych oraz logicznych. A przecież wiedza o stalach nierdzewnych i kwasoodpornych w obecnym stanie techniki jest uporządkowana i można ją zaczerpnąć z licznych opracowań monograficznych, podręczników oraz norm terminologicznych. Dla uporządkowania tej wiedzy proszę Doktoranta o przygotowanie odpowiedzi na poniższe pytania i ich przedstawienie podczas publicznej obrony:

- jakie są kryteria podziału strukturalnego stali nierdzewnych na stale austenityczne, ferrytyczne, martenzytyczne i ferrytyczno-austenityczne itp.?
- proszę podać definicję hartowności stali oraz opinię czy ten parametr materiałowy ma zastosowanie do austenitycznej stali AISI 316?
- czy przytoczona w rozdziale 3.1. w ślad za pozycją literaturową [93] zależność twardości, wytrzymałości i plastyczności od zawartości węgla jest słuszna dla stali nierdzewnych?

Niemniej opracowany przez Doktoranta przegląd stanu wiedzy w tematyce dysertacji oceniam jako wystarczający dla sformułowania zadań badawczych.

Modyfikację laserową powierzchni materiałów wytypowanych do badań przeprowadził Doktorant na stanowisku badawczym wyposażonym w laser impulsowy Nd:YAG o długości fali  $\lambda = 1064\text{nm}$ , czasie trwania impulsu 20ns oraz średniej mocy w punkcie pracy 5,5W, a także w stolik pozycjonowany XY umożliwiający skanowanie próbek wiązką lasera. Plan eksperymentów obejmował kombinacje parametrów operacji tj. częstotliwości impulsów powiązanej z ich mocą szczytową oraz szybkości skanowania próbek. Zakres tych parametrów dobrany został stosownie do gatunków i właściwości badanych materiałów. Ponadto dla stali nierdzewnych AISI 304 i AISI 316 oraz stali typu super Duplex o symbolu 1.4410 Doktorant zbadał również wpływ rozogniskowania wiązki lasera na efekt modyfikacji powierzchni.

Dla zbadania strukturalnych, morfologicznych, mikromechanicznych i funkcjonalnych efektów modyfikacji laserowej powierzchni Doktorant zastosował szerokie instrumentarium badawcze, a mianowicie dyfrakcję promieni rentgenowskich (XRD) dla identyfikacji składu fazowego, spektroskopię Ramana dla identyfikacji tworzących się w procesie warstw tlenków metali, laserową mikroskopię konfokalną (CLSM) dla badania trójwymiarowej, geometrycznej struktury powierzchni, skaningową mikroskopię elektronową (SEM) dla obserwacji morfologii powierzchni, nanoindentację (CSM) dla zbadania instrumentalnej twardości (HIT) oraz instrumentalnego modułu Younga (EIT), a także spektrofotometrię dla oceny całkowitych i dyfuzyjnych widm odbiciowych zmodyfikowanych laserowo próbek stopu PA4. O ile badania struktury geometrycznej oraz morfologii powierzchni badanych materiałów oraz ich właściwości mechanicznych i optycznych zostały poprawnie przeprowadzone i zinterpretowane, to analiza mikrostruktury zmodyfikowanej warstwy wierzchniej w oparciu wyłącznie o badania dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) oraz incydentalnie spektroskopię Ramana jest niewystarczająca dla interpretacji efektów strukturalnych zachodzących w następstwie modyfikacji laserowej. W ocenie recenzenta zabrakło w portfolio badań chociażby metalograficznych badań mikrostruktury warstwy wierzchniej. W tym kontekście tytuł rozprawy zawierający zwrot „*Wpływ parametrów mikroobróbki laserowej na mikrostrukturę ...*” można uznać za koherentny z jej treścią wyłącznie przy założeniu, że pojęcie „mikrostruktura” dotyczy wyłącznie geometrycznej i estetycznej struktury powierzchni. Stąd też również, założone w tezie rozprawy ... „*Zrozumienie natury lokalnych interakcji promieniowania laserowego z powierzchnią obrabianego materiału*” ... jest niepełne, a incydentalnie przytoczone w rozprawie interpretacje mikrostrukturalne zaobserwowanych

efektów mikromechanicznych oraz widm XRD i Ramana są ogólnikowe i nie zawsze poprawne. I tak np.:

- str. 58,- W interpretacji widm XRD napisano: ... „*Jest to spowodowane wzrostem stopnia krystaliczności zmodyfikowanych warstw co wpływa na zwiększenie ich twardości oraz odporności na ścieranie...*”. W ocenie recenzenta kierunek zmian jest odwrotny. Tworzywa metalowe z natury są polikrystaliczne, a ich lokalne przetopienie wiązką lasera i ekstremalnie szybkie schłodzenia za sprawą olbrzymiej pojemności cieplnej zimnego materiału rodzimego może powodować częściową amorfizację materiału w trefie przetopienia,
- str. 66 oraz str. 68, - Doktorant interpretuje umocnienie materiału naprężeniami szczątkowymi wywołwanymi falą uderzeniową oraz obecnością twardych tlenków metali. Proszę Doktoranta o przygotowanie odpowiedzi na pytanie jakie są mechanizmy umacniania metali i które z nich mogą być efektywne w austenitycznych stalach AISI 304 oraz AISI 316 oraz jakie warunki muszą zaistnieć, aby uruchomić te mechanizmy?
- Str. 76, - Interpretując obrazy CLSM Doktorant napisał: ... „*W przypadku stali dwufazowej przetopiony materiał spiętrza się nie tylko na obrzeżach mikro rowków, ale również na poszczególnych ścieżkach tworząc niejednorodne, ciągłe struktury w kształcie wzdłużnych pasm. Jest to niewątpliwie związane z dużą zawartością ferrytu, występującego w formie wzdłużnych wysp otoczonych fazą austenitu*” ... W ocenie recenzenta jest to zapis niejasny bowiem w strefie przetopienia nie ma już ani ferrytu, ani austenitu a jedynie roztwór ciekły żelaza i pierwiastków stopowych.

Poziom edycyjny rozprawy oceniam jako dobry. Dysertacja napisana jest w większości poprawnym, zrozumiałym językiem. Ilustracje są starannie dobrane i sformatowane, a tabele i zawarte w nich dane są czytelne. Recenzent zidentyfikował drobne uchybienia natury korektorskiej i parę uchybień jak np.:

- rys. 4, - klasyfikacja technologii laserowych oraz rys. 5, - zależność gęstości mocy od czasu oddziaływania wiązki zostały zamieszczone i zacytowane w oryginalnej wersji anglojęzycznej. Zdaniem recenzenta rysunki te winny być zreedytowane w języku polskim z przywołaniem źródła ich pochodzenia,
- w obrazach CLMS struktur wyjściowych stali AISI 304 oraz AISI 316 (rys.17) oraz stali typu super Duplex o symbolu 1.4410 (rys. 34a) Doktorant w podpisach ilustracji nie podał lokalizacji pola obserwacji ani też sposobu preparatyki próbki przed obserwacją.

Najszerzy i w zasadzie najlepiej opracowany zakres rozprawy dotyczy laserowego kształtowania geometrycznej struktury powierzchni wybranych tworzyw metalowych, eksploatacji i skalowania parametrycznego lasera jako wielofunkcyjnego narzędzia szeroko wykorzystywanego w technologii maszyn a także charakteryzacji właściwości mikromechanicznych zmodyfikowanej warstwy wierzchniej poprzez wyznaczenie instrumentalnej twardości oraz instrumentalnego modułu Younga w próbach nanoindentacji. Wszystkie te obszary badań przynależą do dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna stąd też stwierdzam, że cała rozprawa przynależy do tej dyscypliny. Jako szczególne osiągnięcie Doktoranta o dużej wartości poznawczej i technologicznej uważam skuteczne zmodyfikowanie laserowe powierzchni stopu aluminium PA4 jako materiału funkcjonalnego na odbłyśniki w systemach ogniw fotowoltaicznych. Zidentyfikowany przez Doktoranta trzykrotny wzrost dyfuzyjnego współczynnika odbicia w zakresie widmowym posiada znaczący potencjał aplikacyjny.

Wskazane w niniejszej recenzji uwagi krytyczne i problemy dyskusyjne nie obniżają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej. Należy je traktować jako przyczynki do głębszej dyskusji podczas publicznej obrony oraz inspiracje dla dalszej kariery naukowej Doktoranta. Formalne wymagania ustawowe dopełnia fakt opublikowania części prezentowanych w rozprawie wyników w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym – Materials oraz Optics and Laser Technology. W publikacjach tych Doktorant jest pierwszym i korespondującym współautorem. Fakt ten, jak i treść i forma całej rozprawy potwierdza umiejętność Doktoranta samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji *rozprawa doktorska spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2021, poz. 478 z późniejszymi zmianami), wnioskuję zatem do Rady naukowej dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich o dopuszczenie mgr inż. Piotra Dywel do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynierijno-technicznych.

Piotr Kula .