

Prof. dr hab. inż. Tomasz Chmielewski  
Instytut Technik Wytwarzania  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Warszawska  
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa  
e-mail: tomasz.chmielewski@pw.edu.pl

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Dominiki Soboń

pt.

„Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-  
6Al-4V natryskanych zimnym gazem”

### 1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 25 stycznia 2024 oraz informacji Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Pana dr. hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. Uczelni z dnia 12.02.2024 r.

### 2. Tytuł rozprawy doktorskiej - aktualność podjętego tematu

Modyfikacja powierzchni poprzez osadzanie powłok o specjalnych właściwościach stanowi aktualną tematykę naukową z ważnym aspektem użytkowym. Natryskiwanie zimnym gazem jest nowoczesną metodą z perspektywą dalszego rozwoju i w ten nurt wpisuje się tematyka rozprawy doktorskiej.

### 3. Charakterystyka i ocena rozprawy - ocena metodyczna (ocena układu rozprawy doktorskiej, ocena zastosowanego piśmiennictwa)

W swojej rozprawie doktorskiej Pani mgr inż. Dominika Soboń przeprowadziła szeroką analizę wpływu obróbki laserowej przetapianiem na właściwości powłok Ti oraz Ti-6Al-4V natryskiwanych metodą zimnym gazem.

Drugim nurtem badawczym opracowania była symulacja numeryczna metodą elementów skończonych procesu przetapiania laserowego powierzchni w celu prognozowania wpływu warunków przetapiania na głębokość strefy przetopionej.

Układ rozprawy doktorskiej jest klasyczny i ma prawidłową budowę. Rozprawa podzielona jest na 5 rozdziałów numerowanych i części nienumerowane, spis treści, wykaz skrótów i oznaczeń, wstęp i streszczenie. Opracowanie liczy 152 strony. Spis literatury obejmuje 152 pozycje. Przegląd piśmiennictwa jest wykonany starannie. Cytowane pozycje literaturowe są aktualne i obejmują artykuły z czasopism naukowych, standardy, materiały konferencyjne i opracowania książkowe. Większość pozycji literaturowych stanowią aktualne publikacje z międzynarodowego obiegu literatury, w tym jeden artykuł współautorski Doktorantki ściśle powiązany z zakresem doktoratu. W rozprawie można zauważyć racjonalne zaplanowanie eksperymentu i prawidłowy dobór metod badawczych.

W rozdziale I 1. pt. „Natryskiwanie cieplne” Autorka scharakteryzowała proces natryskiwania cieplnego przedstawiając istotę jego funkcjonowania, stosowane źródła energii, rodzaje stosowanych materiałów powłokowych.

W rozdziale I 1.1 Szczegółowo opisano proces natryskiwania zimnym gazem, zastosowany w badaniach. Opisano uwarunkowania prędkości krytycznej dla różnych warunków natryskiwania. Scharakteryzowano ogólnie budowę powłoki natryskanej oraz mechanizm jej powstawania.

W rozdziale I 2. Zatytułowanym modyfikacja laserowa powłok natryskanych zimnym gazem, opisano zasadę działania lasera oraz historię jego rozwoju. W dalszej części omówiono rodzaje obróbki laserowej. Opisano warunki przetapiania laserowego powierzchni.

Rozdział I 3. Zatytułowano modelowanie procesu przetapiania laserowego w którym scharakteryzowano ogólnie modelowanie matematyczne metodą elementów

skończonych, a szczególnie potraktowano uwarunkowania modelowania matematycznego MES procesu przetapiania laserowego powierzchni. Opisano model zastosowany w badaniach numerycznych.

Rozdział I 4. przedstawia wnioski z analizy literatury.

W części II zawierającej rozdział 5 postawiono tezę i przedstawiono cel pracy, przybliżono również plan badań.

Rozdział II 6 Przedstawia metodykę badań oraz zastosowaną aparaturę badawczą.

Rozdział II 7 poświęcono na scharakteryzowanie użytych materiałów powłokowych i materiału podłoża, na które natryskano powłoki.

Rozdział II 8 zawiera wyniki badań właściwości powłok natryskanych Ti oraz Ti-6Al-4V w tym charakterystykę morfologii powierzchni powłok, badania mikrostruktury powłok, analizę składu chemicznego, pomiar grubości powłok, pomiary topografii powierzchni, badania składu fazowego materiału powłok, pomiary porowatości, pomiary twardości, chropowatości powierzchni, przyczepności i trzy rodzaje testów odporności na zużycie.

Rozdział II 9 Poświęcono modelowaniu numerycznemu metodą elementów skończonych rozkładu pól temperatury, zasymulowano głębokość przetapiania.

W rozdziale II 10 zatytułowano badania właściwości powłok zmodyfikowanych laserowo i przeprowadzono badania i pomiary właściwości fizycznych umożliwiające porównanie z właściwościami powierzchni przed operacją przetapiania.

W rozdziale III podsumowano przeprowadzone badania i sformułowano wnioski.

W rozdziale IV Autorka przedstawiła propozycję przyszłych badań w obszarze modyfikacji powłok tytanowych natryskiwanych metodą zimnym gazem.

#### 4. Najważniejsze uwagi ogólne i szczegółowe

Koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Doktorantkę poprawnie. Realizację badań oceniam pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest przejrzysta, lecz nie jest wolna od niedoskonałości, choć zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Doceniam trafnie przyjęty zakres eksperymentu oraz dużą liczbę przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników jest właściwa.

Generalnie, praca napisana jest słabym językiem. Autorka nie uniknęła błędów redakcyjnych i językowych oraz niestety merytorycznych, sprawiających wrażenie pośpiechu bez należytej korekty językowej i merytorycznej na etapie wydawniczym, np.:

1. Str. 13 rozdział I 1. W drugim akapicie Autorka twierdzi, że podczas natryskiwania cieplnego w podłożu „nie zachodzą żadne zmiany fazowe”, co jest daleko idącym uproszczeniem. Znane są liczne przykłady zmian fazowych w podłożu inicjowanych ciepłem procesu natryskiwania lub odkształceniem warstwy wierzchniej materiału podłoża. Na stronie 75 Autorka w sprzeczności z swoim poprzednim zdaniem napisała „W przypadku osadzania metalu na podłożu metalowe powstają fazy międzymetaliczne” (co nie jest bezwarunkowe).
2. Opisy wielu rysunków są w języku angielskim.
3. Na stronie 23 Autorka odwołuje się do rysunków o oznaczeniach 10b i 10c, których nie ma w tekście.
4. Na stronie 27 Autorka piszę, że „Lasery wykorzystywane w przemyśle to głównie te o mocy powyżej 1kW, ... „ po czym tabeli 2.1 zestawiono kilka przykładów takiego zastosowania w oparciu o lasery z przedziału mocy znacznie poniżej 1 kW.
5. Na str. 28 Autorka pisze, że jedną z zalet modyfikacji laserowych powierzchni jest „brak odkształceń termicznych” z czym nie można się zgodzić.
6. Wnioski z analizy literatury (str. 37) są w większości bardzo ogólnikowe np. Wniosek 1. „Technika natryskiwania zimnym gazem umożliwia konstituowanie powłok o szczególnych właściwościach, które znalazły szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu”. Wniosek 2. Z którego wynika, że proces doboru materiału powłokowego ma wpływ na właściwości powłoki. Wniosek 4. „Powłoki osadzone z tytanu i jego stopów stanowią przedmiot szczególnego zainteresowania ze względu na ich szczególne właściwości fizykomechaniczne i chemiczne.” Wniosek 5. „Właściwości powłok otrzymanych w technikach zimnego natrysku można modyfikować wykorzystując energię cieplną promieniowania lasera”. Wniosek 8 „Brak jest danych literaturowych dotyczących możliwości przetapiania laserem CO<sub>2</sub> powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskanych zimnym gazem” stoi w sprzeczności z treścią wniosków w publikacji zacytowanej pod numerem [136].
7. Rys. 6.4 przedstawiający ogólny widok urządzenia do obróbki strumieniowości uważam za zbędny, podobnie jak inne zdjęcia stanowisk badawczych w

tym: rys. 6.6; rys. 6.7; rys. 6.8; rys. 6.9; rys. 6.10; rys. 6.12; rys. 6.13; rys. 6.14; rys. 6.15; rys. 6.18; rys. 6.19.

8. Podrozdział 6.11 zatytułowano „Stanowisko do piaskowania ...” co jest żargonem, który w pracy doktorskiej nie powinien występować.
9. Na str. 56 Autorka piszę, że „Tytan często jest stosowany jako materiał powłokowy ...” z czym trudno się zgodzić.
10. Rozdział 7.4 zatytułowano „Pomiar wzdłużnego modułu sprężystości ...” powinno być modułu sprężystości wzdłużnej.
11. Autorka często posługuje się określeniem nano lub mikrotwardość, co jest żargonem. Mamy do czynienia z własnością określaną mianem twardość, którą rzeczywiście można zmierzyć w różnej skali.
12. Na str. 63 Autorka stwierdza, że „W obu badanych powłokach nie stwierdzono występowania mikropęknięć”, a na rys. 8.1 b i 8.2 b widać je wyraźnie.
13. Str. 70. Na rysunku 8.11 przedstawiono mikrostrukturę przekroju powłoki Ti-6Al-4V na potrzebę pomiaru grubości powłoki. Na zdjęciu można zaobserwować zakres zmienności grubości powłoki ponad 100  $\mu\text{m}$ , a w tab. 8.2 odchylenie standardowe wartości średniej pomierzonej grubości powłoki wyznaczono jako 3,06, co wskazuje wytypowanie niereprezentatywnych miejsc do wykonania pomiarów grubości. Pomiar przywołanej wielkości fizycznej należy uznać za niewiarygodny.
14. W tabeli 10.2 zestawiono wyniki pomiarów grubości warstw przetopionych. Odchylenie standardowe dla powłoki Ti-6Al-4V przetapianej z prędkością 2 m/min. wskazano na poziomie 2,08  $\mu\text{m}$ . Natomiast na rysunku 10.19 c przedstawiającym obraz mikrostruktury na którym wykonano ten pomiar obserwowany zakres zmienności tej wartości przekracza 100  $\mu\text{m}$ .
15. Str. 136 „... doskonale właściwości mechaniczne.”
16. Str. 136 „Natryskane powłoki charakteryzują się identycznym składem fazowym jak zastosowany materiał powłokowy. Z czym nie można się zgodzić w kontekście historii temperaturowej procesu dotyczącego reaktywnego tytanu, dodatkowo na takie stwierdzenie nie pozwala świadomość progu czułości metody XRD.
17. Wniosek końcowy 1 jest ogólny i nie wnosi do stanu wiedzy.

18. Wniosek końcowy 2 jest ogólny i do jego sformułowania nie było potrzeby prowadzenia badań, wystarczył przegląd literatury.
19. Wniosek końcowy 4 jest oczywisty. Przetopienie powierzchni materiału i jego krystalizacja z fazy ciekłej zawsze prowadzi do obniżenia chropowatości powierzchni wcześniej uformowanej metodą termo-mechaniczną.

W treści rozprawy występują liczne błędy pisarskie i językowe oraz niezrozumiałe zdania lub zdania pozbawione sensu, które znacznie obniżają wartość opracowania. Poniżej wymieniam wybrane z nich, np.:

1. „W ostatnich czasach coraz częściej zaczęto stosować energię kinetyczną, odchodząc od stosowania wysokiej energii cieplnej”
2. Str. 26 „Przetapianie materiału z wysokimi prędkościami umożliwia ograniczenie ilości energii zaabsorbowanej w materiale, a więc ogranicza również dystorsje ciepła ...”
3. Str. 28 „Podczas przetapiania laserowego, następuje jedynie roztopienie przetapianego materiału, a występująca refleksyjność powierzchni i roztopionego materiału jest bardzo wysoka.”
4. Str. 29 Autorka odwołuje się do spoin, które w przypadku przetapiania powierzchni przecież nie występują.
5. Str. 30 „Proces otrzymania powłok podzielono na trzy etapy: wstępne podgrzanie podłoża (bez podgrzania, ...”
6. Str. 65 „Rozkład liniowy składu chemicznego”
7. Str. 31 „Otrzymana warstwa tlenku jest znacznie trwalsza niż materiał podłoża i posiada lepszą odporność na zużycie w porównaniu do występującego luzem materiału.”
8. Str. 34 „Na etapie wstępnego definiowania ruch modelu numerycznego przeanalizowano oba przedstawione modele źródeł ciepła: ...”
9. Str. 35 „Symulacja całego procesu przetapiania laserowej powłoki natryskanej zimnym gazem wykorzystująca ruchome źródło ciepła składa się z dużej ilości obliczeń”.
10. Str. 36 „Programy wykorzystywane do symulowania ...” symulowanie  $\neq$  symulacja

11. Zdanie pozbawione sensu, str. 68 „Analizy map rozkładów pierwiastków przeprowadzono na powierzchni powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskanych zimnym gazem”.
12. Zdanie pozbawione sensu, str. 71 „Średnia wysokość pierwiastka kwadratowego ( $Sq$ ) dla powłoki Ti jest niższa o ....”
13. Zdanie wewnętrznie sprzeczne, str. 72 „W obu powłokach stwierdzono identyczny rodzaj faz na dyfraktogramach oraz nieznaczne zmiany ich wartości”
14. Zdanie niezrozumiałe, str. 73 „Dla każdej z powłok najniższe wartości uzyskano w centralnej części powłok, a najniższe dla strefy przy podłożu.”
15. Str. 74 „W tym przypadku nastąpiło przekroczenie wytrzymałości adhezyjnej powłoki do podłoża. Może to być efektem osadzonego elektrokorundu podczas piaskowania powierzchni podłoża przed natryskiwaniem zimnym gazem, skutkującego pęknięciem i nieciągłością szczeliny” Koncentracja wad językowych i gramatycznych w tym zdaniu jest rekordowa.
16. Str. 77 „Otrzymane wyniki spowodowane są właściwościami danej warstwy”.
17. Str. 80 „W badanej powłoce Ti przy badanym nie wystąpiło pęknięcie”.
18. Str. 81 „Dodatkowo zaobserwowano przemieszczenie materiału poprzez produkty zużycia, które ulegały szczepieniu się z powłoką.”
19. Str. 82 „Na rysunkach 8.24 i 8.25 przedstawiono próbki w powłoką Ti oraz Ti-6Al-4V natryskaną zimnym gazem przed testem i po teście odporności na zużycie ściernie.”
20. Str. 83 „Zużycie po każdym 5 s można przyjąć, że był zbliżony do siebie.”
21. Str. 84/85 „Znacząco wpływają na przebieg procesu, zwłaszcza na temperaturę jaka się w nim wytwarza.”
22. Str. 85 „W trakcie przetapiania laserowa do obliczania rozkładu pól temperatury brany jest także pod uwagę proces dyfuzji.”
23. Str. 85 „Dobór elementu powinien być zgodny z interpolacją, co oznacza, że w przypadku materiału dwufazowego (występowanie fazy stałej i płynnego metalu) elementy skończone są pierwszego albo drugiego rzędu.”
24. Str. 97 „W przekroju poprzecznym wykonano również analizę map rozkładu elastycznych naprężeń zastępczych (rys. 9.26).”

Poniżej wymieniono uwagi o charakterze dyskusyjnym z prośbą do Autorki rozprawy o ustosunkowanie się:

1. W podrozdziale 8.9 opisano pomiar przyczepności powłok. Procedura polegała na odrywaniu trzpienia przyklejonego do powierzchni badanej powłoki. Podczas odrywania rejestrowano wypadkową dwóch składowych siły o nieznanych relacjach. Pierwsza wynikała z odrywania powłoki, druga ze ścinania powłoki w koło trzpienia. Jak obliczono przyczepność wyrażoną w MPa?
2. Na rys. 10.5a; 10.8a; 10.10a wyraźnie widać pęknięcie w strefie połączenia podłoża i powłoki natryskanej z przetopioną powierzchnią. Dlaczego ten fakt, krytyczny dla oceny stanu powłoki modyfikacyjnej pominięto w dyskusji wyników?
3. Jako przyczynę wzrostu odporności na zużycie po przetapianiu powierzchni Autorka wskazuje wyższą twardość powłoki w tym stanie, pomijając w dyskusji wpływ przetopienia i metalurgiczne związanie cząstek tworzących powłokę. Proszę o uzasadnienie dominującego wpływu twardości.
4. W obecnym stanie wiedzy modelowanie matematyczne procesów fizycznych ze względu na relatywność wyników, kalibrowane jest na podstawie danych uzyskanych z eksperymentu fizycznego. W niniejszej rozprawie tę kolejność odwrócono, proszę o komentarz.
5. Przetopienie natryskanej powłoki na głębokość około połowy jej grubości powoduje znaczny wzrost poziomu naprężeń własnych powłoki. W kontekście ograniczonej przyczepności powłoki natryskanej, znacząco wzrasta ryzyko delaminacji. Proszę o dyskusję potencjalnych skutków przetopienia całej grubości powłoki i metalurgicznego związania powłoki z podłożem.

## 5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Dominiki Soboń nt. „Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskanych zimnym gazem” jest interesującą dysertacją o aktualnej tematyce. Praca doktorska reprezentuje dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna. Niepodważalnym walorem i oryginalnym osiągnięciem Pani Doktorantki jest opracowanie warunków laserowego przetapiania powierzchni powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskanych zimnym gazem i opis wpływu przetopienia na zmianę właściwości powierzchni.



Podjęty w rozprawie temat jest ważny i wnosi wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. Doktorantka wykonała badania w warunkach laboratoryjnych, a ich rezultat ma potencjał wdrożeniowy.

Doktorantka wykazała się umiejętnością planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej uzyskanych wyników. Autorka osiągnęła główny cel postawiony w pracy. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wystarczającą wiedzę teoretyczną Doktorantki oraz umiejętność prowadzenia pracy naukowo-badawczej.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

1. Opisanie i wyjaśnienie wpływu przetapiania laserowego powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskanych zimnym gazem na ich właściwości.
2. Opracowanie warunków technologicznych (choć ich szczegółowo nie opisano) przetapiania laserowego powłok natryskanych metodą zimnym gazem.

Uważam, że recenzowana rozprawa prezentuje dość dobry poziom merytoryczny, zawiera element nowości i wnosi wkład do dyskusji nad rozwojem techniki modyfikacji powierzchni.

Ponadto stwierdzam, że Autorka wykazała się wystarczającą wiedzą, umiejętnością planowania i realizacji badawczych prac naukowych, umiejętnością oceny i interpretacji uzyskanych wyników.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określone w art. 13 ust.1 ustawy z dnia 14 III 2003 (Dz. U. 2017 r., poz. 1789, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Warszawa, 25 maja 2024 r