



# INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

im. Roberta Szewalskiego

POLSKIEJ AKADEMII NAUK

80-231 Gdańsk

ul. J. Fiszera 14

Tel. (centr.): 58 3460881

Fax: 058 3416144

e-mail: [imp@imp.gda.pl](mailto:imp@imp.gda.pl)

Tel. (sekr.): 58 3416071

[www.imp.gda.pl](http://www.imp.gda.pl)

dr hab. inż. Alicja Krella, prof. IMP PAN

Instytut Maszyn Przepływowych PAN

Ośrodek Hydrodynamiki

Zakład Kawitacji

ul. Fiszera 14

80-231 Gdańsk

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Kamila Pasierbiewicza pt.:  
**„Właściwości tribologiczne powłok ceramicznych nałożonych  
na laserowo spiekany stop tytanu”**

wykonanej pod opieką promotora Pana dr hab. inż. Mariusza Walczaka, prof. uczelni

### Uwaga formalna

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo Z-cy Przewodniczącego ds. stopni naukowych dr hab. Jarosławia Bienasia z dnia 24 czerwca 2022 r. wynikające z uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej oraz dołączona rozprawa doktorska.

### **1. Charakterystyka i ocena formalna rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Pasierbiewicza przedstawiona została w postaci zwartej opracowania na 118 stronach formatu A4. Struktura opracowania nie odbiega od przyjętych standardów dla tego typu prac i została logicznie podzielona na dwie części, na które składa się 11 numerowanych rozdziałów. Pierwsza część pracy została poprzedzona wykazem symboli i skrótów oraz wstępem. Zaprezentowany wykaz oznaczeń odnosi się m. in. do równań oraz wykresów, co ułatwia interpretację i analizę treści, a przy tym podnosi jakość opracowania rozprawy. Pierwsza część rozprawy prezentuje analizę stanu wiedzy i składa się z 6 rozdziałów, które przedstawiają charakterystykę laserowego spiekania proszków metali DMLS, charakterystykę stopu tytanu Ti6Al4V w kontekście technologii wytwarzania DMLS, potencjalne zastosowania stopu Ti6Al4V spiekanego laserowo w kontekście budowy

i eksploatacji maszyn oraz modyfikacji warstwy wierzchniej, modyfikacje powierzchni stopów Ti6Al4V, podsumowanie części teoretycznej wraz z uzasadnieniem podjęcia tematu badań, prezentacją celi oraz tezy rozprawy doktorskiej. Część druga rozprawy nazwana częścią eksperymentalną składa się z 5 rozdziałów, w których przedstawiony został zakres badań, materiał badany, metodyka badań, wyniki badań, dyskusję wyników badań oraz wnioski. Całość zamyka spis literatury związany z realizowanym tematem.

Wstęp zawiera wprowadzające informacje do problematyki laserowego spiekania proszków stopu Ti6Al4V. W pierwszym rozdziale obejmującym 5 stron dokonano przeglądu danych literaturowych związanych z wytwarzaniem przyrostowym (AM - Additive Manufacturing) oraz metodzie bezpośredniego laserowego spiekania proszków metali DMLS (Direct Metal Laser Sintering). W rozdziale tym przedstawiono istniejące technologie przyrostowe oraz opisano zasadnicze własności materiałów wytwarzanych tą technologią. Szkoda, że w tym miejscu zabrakło szczegółowego opisu wpływu parametrów procesu DMLS na własności wytworzonych elementów, w szczególności na wady materiałowe. Przykładowo, Doktorant pisze, że w pracach analizowano porowatość, ale nie podaje przedziału porowatości typowej dla tej metody wytwarzania, ani jak parametry wytwarzania wpływają na jej wielkość. Drugi rozdział obejmuje 2 strony i przedstawia rodzaje materiałów możliwych do wytworzenia tą technologią oraz własności stopu tytanu Ti6Al4V. Z pracy nie wynika, czy podane własności stopu tytanu Ti6Al4V to własności tego stopu wytwarzanego metodą klasyczną, czy technologią AM. Niestety, Doktorant nie uchronił się od powtórzeń. Następnie Doktorant opisuje strukturę stopu Ti6Al4V spiekane laserowo w oparciu o literaturę. Szkoda, że nie został zamieszczony wykres CTP z zaznaczonymi punktami odpowiadającymi poszczególnym opisanym strukturom. Rozdział 3 został zaprezentowany na 3 stronach i przedstawia możliwości technologii DMLS (Direct Metal Laser Sintering) oraz możliwości zastosowań wydruków. W rozdziale 4 obejmującym 5 stron zostały przedstawione podstawowe własności powłok wytwarzanych metodą osadzania fizycznego z fazy gazowej (PVD), takie jak twardość, moduł Younga, przedział grubości tych powłok oraz wartości współczynnika tarcia. Wytwarzanie i własności powłok PVD jest to bardzo szeroka tematyka, Doktorant dokonał poprawnej selekcji informacji i przedstawił te ściśle związane z rozprawą. Następnie, w rozdziale 5 obejmującym 1 stronę została przedstawiona motywacja podjęcia tematu badań. W rozdziale 6 przedstawiono cele rozprawy: naukowy i użytkowy oraz tezę pracy. Cele pracy postawione są jasno i w poprawnie. W części eksperymentalnej, w rozdziale 7 przedstawiony został zakres badań w sposób bardzo przejrzysty na 2 stronach. Kolejne rozdziały 8, 9 i 10 poświęcone są opisowi badanemu stopowi tytanu wytwarzanemu w sposób konwencjonalny oraz przy użyciu systemu laserowego spiekania proszków metali oraz powłokom AlTiN, TiAlN i TiSiN wytwarzanym w procesie PVD rozpylania magnetronowego, metodyce badawczej oraz prezentacji wyników badań dla każdej stali z osobna we właściwych podrozdziałach. **Na szczególne uznanie zasługuje zaprojektowanie i wykonanie urządzenia do pomiaru grubości powłok metodą wyszlifowania krateru zgodnego z normą PN-EN 1071-2:2003 oraz tribotestera zgodnego z normami ASTM G99-04a, DIN 50324.** Rozdział 10 to starannie przeprowadzona prezentacja wyników badań zrealizowana na 47 stronach. Niestety opisy badanych materiałów na wielu wykresach typu ramka – wąsy są mało czytelne. W rozdziale 11 na 6 stronach przeprowadzona została analiza i dyskusja uzyskanych wyników. Część eksperymentalna pracy zakończona jest sformułowaniem 13 wniosków wynikających

z przeprowadzonych prac badawczych i wykazaniem osiągnięcia postawionych celów pracy oraz udowodnieniem przyjętej tezy.

Wykaz cytowanej literatury zawiera 110 pozycji, co wskazuje na poprawnie przeprowadzoną analizę stanu wiedzy w obszarze tematu rozprawy. Głównie jest to literatura zagraniczna o zasięgu międzynarodowym, w tym 8 pozycji współautorskich Doktoranta.

Układ pracy jest jasny i przejrzysty. Doktorant w sposób prawidłowy opanował stosowanie zwrotów i opisów technicznych, a terminologia i pojęcia stosowane w pracy są stosowane poprawnie.

Tytuł przedstawionej rozprawy „*Właściwości tribologiczne powłok ceramicznych nałożonych na laserowo spiekany stop tytanu*” koresponduje z treścią zawartą w pracy.

Mimo starannej redakcji pracy, Doktorant nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć i nieścisłości:

- str. 9, Doktorant poruszając temat naprężeń w warstwie wierzchniej powołuje się na rys. 5, jednak na rysunku tym są dwa wykresy i wiele krzywych. Zalecane jest opisanie każdego wykresu oraz podanie odniesienia do konkretnego wykresu lub krzywej. Ponadto, skoro rozprawa jest napisana w języku polskim, to opisy na rysunkach również powinny być w języku polskim.
- str. 17, sformułowanie „*inna mechanika własności wykazywanych przez powłokę i podłoże*” jest nieprawidłowe. Powinno być np. „*inne własności powłoki i podłoża*”.
- str. 19, „*Dla tego utworzona powłoka jest silniej związana z podłożem.*” Niewłaściwie umieszczona spacja w wyrazie „Dla tego”. Ponadto, zalecałabym w przyszłości stosowanie większej ostrożności w formułowaniu takich stwierdzeń. Z podanego zdania można wyciągnąć wniosek o generalnej lepszej adhezji powłok wytwarzanych metodą magnetronową w porównaniu z innymi technologiami PVD. Adhezja powłok do podłoża zależy od wielu czynników. Szkoda, że nie zostały one choć wspomniane.
- str. 20 „*...kilku autorów dowiodło techniki napyłania równoległego*” powinno być np. „*...kilku autorów zastosowało techniki napyłania równoległego*”.
- str. 27, „*Pierwsze 3 mm wydruku stanowiła gęsta struktura podporowa w postaci siatki kwadratowej o wypełnieniu 80%*”. „Wypełnienie 80%” sugeruje, że porowatość jest na poziomie 20%, zatem tutaj zalecałabym unikanie słowa „*gęsta*”, ponieważ zestawienie zwrotów „*gęsta*” i „*wypełnienie 80%*” są ze sobą w pewnej sprzeczności.
- str. 28, W tabeli 2 podane są przedziały zakładanych grubości powłok, które są inne dla każdej powłoki i bardzo szerokie (2,0÷7,0 μm). Powinny być podane zakładane konkretne grubości powłok. Grubość powłok wpływa na naprężenia wewnętrzne, z tego względu jedynie powłoki o tej samej lub bardzo zbliżonej grubości powinny być ze sobą porównywane, zwłaszcza gdy badane jest zużycie powłok.
- str. 29, „*Polerowanie stopów przeprowadzono zgodnie z opisem zamieszczonym w rozdziale 7.*” Opis polerowania znajduje się w rozdziale 8.
- str. 35, Nie wszystkie podane równania zostały ponumerowane. Ponadto, we wzorze na sztywność S, zabrakło odniesień dla siły i przemieszczenia do danych przedstawionych na

rys. 19. Innymi słowy, nie wiadomo jaka wartość siły i przemieszczenia była uwzględniana przy wyznaczaniu parametru S.

- str. 40, Opisy na rys. 25 powinny być w języku polskim.

- str. 46, Rys. 30. przedstawia zależność odległości międzypłaszczyznowej  $d_{311}$  w funkcji  $\sin^2\psi$  dla stopu aluminium 5056-0. Nie podano, czy został on opracowany na podstawie własnych badań, czy był z innej pracy.

- str. 48, Szkoda, że wartości liczbowe osi na rys. 31, w szczególności osi Z (wysokości profilu) są tak małe, że jest niemożliwy ich odczyt.

-str. 49-51, Na rys. 32-39 linie pomiaru profili chropowatości są bardzo słabo widoczne, szkoda, że ich nie pogrubiono lub nie zwiększono intensywności koloru celem ich lepszej widoczności.

- str. 52, Przy prezentacji wyników grubości powłok Doktorant nie podał liczby pomiarów, w oparciu o które wyznaczył odchylenie standardowe zamieszczone w tabeli 4.

- str. 67, Błąd edytorski. Zdanie rozpoczęte małą literą: „*powiązane jest to z 15% wyższą*”, powinno być „*Powiązane jest to z 15% wyższą...*”.

- str. 86, „*Początkowo niskie wartości wynikają z docierania...*” chyba miało być „*Początkowe niskie wartości wynikają z docierania ....*”

- str. 91. „*Wykruszone pozostałości powłoki transportowane przez przeciwpróbkę mogą determinować zużycie.*” Powinno raczej być „*Wykruszone pozostałości powłoki transportowane przez przeciwpróbkę mogą zwiększyć zużycie.*”

Uwagi te mają pomniejszy charakter i **nie wpływają na wartość rozprawy**. Pod względem formalnym praca została opracowana poprawnie, jej struktura odpowiada przyjętym zasadom dla rozpraw doktorskich, a objętość jest zgodna z przyjętymi zasadami i z potrzebą opisu obszernego programu badań.

## 2. Ocena merytoryczna pracy

Wytwarzanie przyrostowe AM (Additive Manufacturing) powszechnie znane jako wydruk 3D jest coraz bardziej stosowane ze względu na możliwość szybkiego wykonania elementów w oparciu o przestrzenne modele CAD i kształtach trudno lub nie osiągalnych przy użyciu technologii konwencjonalnych. Jedną z metod AM jest bezpośrednio laserowe spiekanie proszków metali DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Wytwarzanie odbywa się przez stapianie warstw drobnego proszku metalowego za pomocą wiązki lasera. Tematykę badań dotyczącą porównania własności stopu tytanu Ti6Al4V wytworzonego metodą AM i w sposób konwencjonalny oraz powłok PVD wytworzonych na nich uważam za aktualną i istotną nie tylko z naukowego punktu widzenia ale również użytkowego. Uzyskane wyniki badań mogą stanowić cenną informację dla konstruktorów i technologów. Doktorant w sposób bardzo przejrzysty przedstawia technologię DMLS i zastosowania elementów tak wytworzonych, oraz wagę osadzania twardych, przeciw-zużyciowych powłok ochronnych na nich. Wybór tematyki

pracy uważam za w pełni uzasadniony, a sformułowanie tematu rozprawy poprawne. Na podstawie analizy stanu wiedzy Autor sformułował naukowy i użyteczny cel pracy:

*„Celem naukowym jest określenie związku pomiędzy mikrostrukturą, morfologią i właściwościami mechanicznymi warstwy wierzchniej stopu Ti6Al4V spiekanego laserowo a przyczepnością i właściwościami tribologicznymi wybranych powłok ceramicznych.”*

*„Cel użyteczny to wykazanie, że technologia wytwarzania stopu Ti6Al4V przez bezpośrednio laserowe spiekanie proszku DMLS jest możliwa do zastosowania w celu wykonania węzłów maszyn takich jak przeguby humanoidalnych robotów i wielotrapezowe zamki łopatek silników turbinowych, a zastosowanie cienkich powłok ceramicznych prowadzi do podwyższenia trwałości układu spiekany laserowo stop tytanu-ceramika.”*

oraz przyjął jedną tezę:

*„Stan warstwy wierzchniej stopu tytanu po spiekaniu laserowym DMLS nie wpływa istotnie na właściwości tribologiczne ceramicznych powłok azotkowych, ale poprawia ich właściwości adhezyjne.”*

Przedmiotem badań był stop tytanu Ti6AlV4 wytworzony konwencjonalnie i technologią DMLS laserowego spiekania proszku oraz rozpylane magnetronowo powłoki PVD: AlTiN, TiAlN, TiSiN. Doktorant prawidłowo przyjął cele pracy oraz zaplanował i zrealizował program badań. Dla osiągnięcia celi i udowodnienia tezy wykorzystał szerokie spektrum metod badawczych obejmujących m.in. badania struktury materiałów przy użyciu mikroskopii świetlnej i skaningowej mikroskopii elektronowej SEM, badania topografii powierzchni, badania składu fazowego XRD, analizę naprężeń własnych, pomiary grubości powłok metodą wyszlifowania krateru wg normy PN-EN ISO 26423:2016-05, pomiary nanotwardości i modułu Younga metodą Oliviera & Phara wg normy PN-EN ISO 14577-1:2015-09, badania odporności na zużycie przez tarcie oraz pomiar przebiegu współczynnika tarcia z zastosowaniem pary trącej typu kula - tarcza, badania przyczepności powłok w teście odporności na zarysowanie (scratch- test) wg normy ASTM C1624-05, test przyczepności powłok Rockwella wg normy VDI3109. Metodologia badań i zrealizowany program jest dobrze opisany i świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu w obszarze współczesnych metod pomiarowych i planowania eksperymentu. Niestety, w rozdziale 8 poświęconym prezentacji badanych materiałów zabrakło podania dokładnych wymiarów próbek oraz czasu osadzania powłok, a w rozdziale 9 - warunków prowadzenia badań XRD cienkich powłok, tj. kąta padania wiązki. Wykonane obszerne i kompleksowe badania poparte są licznymi zdjęciami SEM i wykresami, oraz dużą ilością graficznych i statystycznych zestawień, które stanowią silną stronę tej rozprawy. Na uznanie zasługują przeprowadzone testy analizy statystycznej, które dodatkowo zwiększają

wartość naukową i użyteczną uzyskanych wyników. Doktorant w sposób biegły i dojrzały prowadzi analizę i dyskusję wyników. Niestety, w części poświęconej dyskusji (rozdział 11) Doktorant nie ustrzegł się powtórzeń z części prezentacji uzyskanych wyników. Ponadto, czuje się pewien niedosyt w prezentowanej analizie, w szczególności zabrakło mi poszukiwań zależności między własnościami badanych materiałów, a wynikami testów tribologicznych. Całość pracy dopełnia 13 wniosków z przeprowadzonych badań, które są w zgodności z postawionymi celami i tezą pracy.

#### **Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należą:**

1. Opracowanie i budowa urządzenia do pomiaru grubości powłok metodą wyszlifowania krateru zgodnie z normą PN-EN 1071-2:2003. Zaprojektowanie i wykonanie tego urządzenia świadczy o konstrukcyjnych i praktycznych umiejętnościach Doktoranta.
2. Opracowanie autorskiego urządzenia do badania odporności na zużycie przez tarcie w układzie kula - tarcza (tribotestera) zgodnego z normami ASTM G99-04a, DIN 50324, tj. wykonanie projektu konstrukcyjnego, jego budowę oraz przeprowadzenie testów urządzenia świadczy o wyjątkowych dociekaniach konstrukcyjnych w obszarze inżynierii mechanicznej i umiejętnościach praktycznych Doktoranta.
3. Przeprowadzenie komplementarnego zakresu badań związanych z oceną czynników i właściwości mających wpływ na zużycie tribologiczne badanych powłok PVD. Zwłaszcza rozszerzenie tego zakresu o analizy statystyczne jest niewątpliwym uzupełnieniem aktualnego stanu wiedzy. Analiza wyników eksperymentalnych w kontekście analizy statystycznej sprawia, że praca ma charakter użyteczny.

#### **Do najważniejszych osiągnięć rozprawy doktorskiej należą:**

1. Informacje dotyczące wartości parametrów sieciowych powłok PVD uzyskanych metodą magnetronową i naprężeń w powłokach oraz w warstwie wierzchniej podłoża, a w szczególności wpływie osadzenia powłok PVD na naprężenia w warstwie wierzchniej podłoża. Pod tym względem literatura jest bardzo uboga.
2. Wykazano że przy ocenie trwałości i jakości cienkich powłok PVD powinno zachowywać dużą ostrożność, gdy ocena ta opiera się o jeden rodzaj testu. Takich badań porównawczych wpływu testu adhezji, poza niniejszą pracą nie prowadzono.

### **3. Uwagi, wątpliwości i zapytania**

Zawartość merytoryczną rozprawy oceniam pozytywnie, jednak podczas zapoznawania się z treścią rozprawy nasunęły mi się pewne pytania i uwagi. Proszę o ustosunkowanie się do wyszczególnionych poniżej:

1. str. 35, Doktorant podał, że „ $A_p(h_c)$  jest polem przekroju wgłębniaka..” później podaje wzór na  $A(h_c)$ . Czy  $A_p(h_c)$  jest to co innego niż  $A(h_c)$ , czy jedynie doszło do błędu

edytorskiego? Jaki cel miało wyznaczenie stałych wykładniczych  $C_0 - C_n$  i jaka była ich wartość? W części poświęconej prezentacji wyników nie znalazłam tej informacji.

2. str.36, Doktorant podał, że „Współczynnik Poissona analizowanych próbek założono odpowiednio: dla powłok TiSiN, TiAlN, AlTiN  $\nu_s = 0,24$ ”, W oparciu o jakie dane przyjęto podany współczynnik Poissona?
3. str. 41, Doktorant podaje, że „Badania realizowano na tribotesterze CSM Instruments oraz na autorskim aparacie opartym o analogiczną zasadę działania”, w dalszej części metodyki badań podane są warunki badań, domyślam się, że na obydwu urządzeniach. Przy prezentacji wyników badań, nie zostało jednak zaznaczone jakie wyniki którym urządzeniem zaprezentowano, zabrakło również porównania wyników uzyskanych jednym i drugim tribotesterem. Zatem nasuwa się pytanie, które urządzenie zastosowano w prezentowanych wynikach i jaki był rozrzut wyników między tymi uzyskanymi autorskim sprzętem a tymi z komercyjnego urządzenia firmy CSM Instruments?
4. str. 47, Doktorant podaje, że „wszystkie próbki przed nałożeniem powłok ochronnych polerowano przy jednakowych parametrach i z użyciem jednakowych materiałów polerskich.” Najczęściej próbki poleruje się do uzyskania określonej chropowatości. Ponieważ uzyskano różnice, jak wykazano w prezentacji wyników, to domyślam się, że co innego było takie same, np. czas polerowania. Mam zatem pytanie, jaki był czas polerowania?
5. Doktorant wyznacza głębokość wnikania promieniowania rentgenowskiego badanych materiałów, tj. stopu tytanu (faza  $\alpha$ -Ti) oraz powłok AlTiN, TiAlN, TiSiN osadzonych stopie tytanu. Zgodnie ze wzorem (13) podanym na stronie 46 konieczna jest znajomość liniowego współczynnika absorpcji promieniowania rentgenowskiego. Jakie wartości tego współczynnika przyjęto dla wspomnianych materiałów i w jaki sposób współczynniki te zostały wyznaczone?
6. Zgodnie z tabelą 6 (str. 65), głębokości wnikania promieni rentgenowskich znacznie przekraczały grubości wytworzonych powłok. Czy uwzględniono to przy obliczeniach naprężeń własnych? Jeśli tak, to w jaki sposób były one uwzględnione. Grubość powłok wpływa na naprężenia wewnętrzne. W przypadku gdy różnica jest ponad dwukrotna (powłoki TiSiN i TiAlN), jej wpływ jest już znaczny.
7. str. 47, „przy chropowatości powierzchni poniżej  $S_a = 0,1 \mu\text{m}$  wpływ taki może być nieznaczny względem pozostałych czynników”. Proszę podać te czynniki i opisać ich wpływ.
8. str. 47 c.d., Z opisu prezentacji pomiarów chropowatości można odnieść wrażenie, że tylko jeden pomiar, którego obszar wynosił  $0,1 \times 0,1 \text{ mm}$ , został przeprowadzony. Podany obszar pomiarowy jest bardzo mały obszar, zatem jaka jest pewność, że wytypowane miejsce jest reprezentatywne dla całej powierzchni? W tabeli 3 podane są wartości parametrów  $S_a$ ,  $S_q$  oraz  $S_{ku}$  bez podania rozrzutu wyników. Ile wynosiły odchylenia średnie?

9. W opisie technologii osadzania powłok podano parametry osadzania, tj. temperaturę, warunki trawienia jonowego, i wartość ciśnienia w komorze, oraz, że parametry były typowe dla rutynowego procesu przemysłowego pokrywania narzędzi skrawających (str. 28). Pomiary grubości powłok (tab. 4) wykazały znaczne różnice między powłokami TiAlN i AlTiN, a TiSiN. Szkoda, że nie ustosunkowano się to tego ani w prezentacji wyników, ani w dyskusji. Proszę o podanie przyczyny lub przyczyn ponad połowie mniejszej grubości powłok TiSiN w porównaniu do powłok TiAlN i AlTiN. Dlaczego nie wytworzono wszystkich powłok o tej samej grubości?
10. str. 55, Kąt padania wiązki wpływa na wielkości pików uzyskiwanych w badaniach XRD. Powłoki TiAlN i AlTiN mają ~ 7  $\mu\text{m}$  grubości, a powłoka TiSiN około 3  $\mu\text{m}$ , więc kąt padania wiązki względem powierzchni próbki powinien być mały. Zastosowanie dużego kąta może być przyczyną nakładania się pików i trudności ze znalezieniem właściwych związków. Stąd moje zapytanie: przy jakim kącie padania wiązki przeprowadzono pomiary XRD? Z opisu badań to wprost nie wynika. Doktorant pisze dalej, że „*Badania przy różnym kącie padania wiązki promieniowania rentgenowskiego mogą sugerować, że zewnętrzna warstwa powłoki jest wzbogacona w Si*”. Jakie kąty padania wiązki zastosowano w tych badaniach?
11. str. 72, Doktorant podaje, że „wartości analizowanych parametrów mechanicznych powłok są porównywalne z przypadkami analizowanymi w literaturze na innych podłożach, np. takich jak węgiel spiekany [91,106]”. Niestety, ale nie mogę się z tym zgodzić. Uzyskane wartości twardości powłok PVD są niższe niż te, które można spotkać w literaturze. Przykładowo w pracy Materials Science and Engineering A 527 (2010) 4447–4457, twardość powłoki TiSiN o grubości około 2  $\mu\text{m}$  wynosi około 45 GPa, a w rozprawie w tabeli 8 (str. 68) twardość tej powłoki to 30,6 ÷ 32,5 GPa. W pracy J Mater Sci (2010) 45:3812–3823 badano powłokę TiAlN o grubości 3,4  $\mu\text{m}$ , której twardość wynosiła 27,8 GPa. W pracy [106], w której również badano powłokę TiAlN i na którą się powołuje Doktorant, twardość powłoki to 28,2 GPa. W pracy (tabela 8) podano, że twardość tej powłoki wynosi 23,3 ÷ 23,6 GPa. Czym Doktorant tłumaczy te różnice?
12. str. 76-82, Pomiary przyczepności. Zastanawia mnie brak spójności między podanymi w tabeli 14 (str. 76) wartościami siły krytycznej  $L_{cr}$ , która była interpretowana jako siła adhezji, poszczególnych układów powłoka - podłoże, a załączonymi przebiegami zarysowania i wykresami emisji akustycznej uzyskanymi z urządzenia MCT firmy Anton Paar (rys. 74 – 79). Proszę o podanie dokładnych kryteriów wyznaczania siły  $L_{cr}$  dla poszczególnych powłok. Dlaczego nie podano siły  $L_{c1}$  – siły, przy której odnotowano pojawienie się pierwszych pęknięć w powłoce? Zgodnie z tabelą 14, adhezja powłoki TiSiN jest porównywalna z powłoką TiAlN, co Doktorant zaznacza w dyskusji. Niemniej przy prezentacji wyników z testu Rockwella, a następnie wyników testu tribologicznego oraz w dyskusji wyników testu tribologicznego wspomina o wykazanej słabej adhezji powłok TiSiN. Proszę o ustosunkowanie się do tego.
13. str.85, Doktorant prezentuje wartości współczynnika zużycia  $K$  w opisie i na wykresie 85, natomiast ani w tym miejscu, ani w metodyce badań odporności na zużycie przez



tarcie (rozdz. 9.3.5) nie podał wzoru na wyznaczenie współczynnika zużycia. Zgodnie z dobrymi zwyczajami, taki wzór powinien znaleźć się w pracy. Szkoda, że wartości tych współczynników nie zamieścił również w tabeli 16, ułatwiłoby to czytającemu analizę wyników.

14. str. 86. Uzyskane wartości współczynników tarcia powłok PVD są wyższe niż te, które można spotkać w literaturze. Czym Doktorant tłumaczy te różnice? Ponadto, współczynniki tarcia powłok są większe niż odpowiednich podłoży. Czym Doktorant tłumaczy uzyskanie takich wyników?
15. Testy tarciove prowadzone były w warunkach tarcia suchego przy stosunkowo dużej prędkości liniowej (100 mm/s) i dużej sile docisku (10N), bardzo małym promieniu tarcia (3 mm) i małej chropowatości powierzchni ( $S_a < 0,1 \mu\text{m}$ ), czyli przy bardzo dobrym przyleganiu kulki do powierzchni powłok. Zatem, należy się spodziewać wzrostu temperatury w obszarze tarcia. Dlaczego przy analizie wyników nie uwzględniono lokalnego wzrostu temperatury?
16. str. 96, Doktorant zauważa, że „rodzaj technologii kształtowania podłoża (spiekanie laserowe / konwencjonalne technologie) nie ma istotnego statystycznie wpływu na twardość i moduł sprężystości ceramicznych powłok azotkowych nanoszonych na analizowany stop tytanu ale istotnie wpływa na poprawę ich adhezji do podłoża.” Twardość i moduł sprężystości ceramicznych powłok azotkowych zależy od parametrów osadzania, adhezja ponadto od własności podłoża, w szczególności jego twardości. Czy przypadkiem wzrost twardości i modułu Younga podłoży wytwarzanych spiekaniem laserowym i strukturą martenzytyczną nie ma głównego wpływu na poprawę adhezji?
17. Str. 101, We wniosku 7 Doktorant podaje, że „powłoki TiSiN wykazały objawy zużycia adhezyjnego już na wczesnym etapie testu”, a w tabeli 14, wartości siły krytycznej dla tej powłoki są największe. Jest tutaj sprzeczność. Proszę o ustosunkowanie się.

W tym miejscu chciałabym zaznaczyć, że **powyższe pytania oraz uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o recenzowanej pracy doktorskiej Pana mgr inż. Kamila Pasierbiewicza**. Praca dotyczy zagadnień związanych z inżynierią powierzchni, które bardzo dobrze wpisują się w dyscyplinę inżynieria mechaniczna.

#### 4. Wniosek końcowy

Pozytywnie oceniam przedstawioną rozprawę doktorską i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Kamila Pasierbiewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Pan mgr inż. Kamil Pasierbiewicz w przedłożonej rozprawie doktorskiej zrealizował obszerny i ciekawy program badawczy. Tematyka pracy mieści się w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. Doktorant wykazał się dużą dojrzałością naukową, samodzielnością w planowaniu i realizacji badań, poprawną analizą i interpretacją ich wyników zmierzającą do rozwiązania problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy. Powyższe cechy pozwoliły na osiągnięcie postawionego celu, sformułowanie wniosków, a w konsekwencji przygotowanie wartościowej rozprawy na bardzo dobrym

poziomie merytorycznym. Uzyskane wyniki są oryginalne i zawierają elementy nowości.  
**W mojej ocenie praca zasługuje na wyróżnienie, o co niniejszym wnoszę.**

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Kamila Pasierbiewicza pt.: „*Właściwości tribologiczne powłok ceramicznych nałożonych na laserowo spiekany stop tytanu*” spełnia w pełni wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789), rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. z 2018 r. poz. 261), oraz w ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r poz. 1669 ze zm.). W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy mgr inż. Kamila Pasierbiewicza i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

Gdańsk, dnia 22.08.2022

.....  
Alicja Krella