

dr hab. inż. Grzegorz Rogalski, prof. PG

Gdańsk, 23.08.2022

Politechnika Gdańska

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa

Instytut Technologii Maszyn i Materiałów

Zakład Technologii Materiałów Konstrukcyjnych i Spajania

ul. Gabriela Narutowicza 11/12

80-233 Gdańsk

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Pasierbiewicza pod tytułem „Właściwości tribologiczne powłok ceramicznych nałożonych na laserowo spiekany stop tytanu”** wykonanej pod opieką Promotora Pana dr. hab. inż. Mariusza Walczaka, prof. uczelni na podstawie pisma Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej, Politechniki Lubelskiej z dnia 24 czerwca 2022 roku. Sygnatura pisma: RDN/IM/277/2022

### **Wprowadzenie, tematyka rozprawy**

Widoczny od wielu lat dynamiczny i ciągły rozwój różnych sektorów przemysłowych (m.in. lotniczego, medycznego, zbrojeniowego) skłania wytwórców do stosowania szerokiego spektrum materiałów konstrukcyjnych. Znajdują w nich zastosowanie metale, polimery, ceramika oraz kompozyty. Często również wykorzystuje się materiały, które poddawane są modyfikacjom np. poprzez zmianę właściwości warstw wierzchnich. Niezależnie od technologii otrzymywania materiały te muszą spełniać ściśle określone kryteria. Dotyczą one szeroko pojętych właściwości mechanicznych, ale również tych powiązanych z warunkami eksploatacji. Prowadzi to do powstania zależności pomiędzy wskazanymi cechami. Przykładem takiej korelacji jest połączenie wysokich parametrów wytrzymałościowych z odpornością na korozję, co jest już pewnym standardem. Można jednak spotkać obszary, w których skojarzenie pewnych cech nie jest oczywiste i proste technologicznie do uzyskania. Dodatkowo procesy wytwarzania dla takich wyrobów charakteryzują się wieloma zmiennymi istotnymi opisującymi proces. To w znacznym stopniu utrudnia określenie ich wpływu na uzyskane właściwości. Z taką sytuacją można spotkać się między innymi w przypadku powiązania wysokiej odporności na korozję z brakiem wrażliwości na różnego rodzaju mechanizmy zużycia tribologicznego. Ma to niezwykle istotne znaczenie w przypadku budowy ruchomych węzłów konstrukcyjnych. Doktorant informuje o tym w swojej pracy podając przykłady przegubów humanoidalnych robotów oraz wielotrapezowych zamków łopatek silników turbinowych. Pozyskanie zatem usystematyzowanej wiedzy na temat właściwości tribologicznych jest niezwykle istotne. Odpowiednie badania oraz sformułowane na ich podstawie wnioski, umożliwią zwiększenie sprawności, niezawodności oraz trwałości eksploatowanych mechanizmów.

Autor w swojej dysertacji przedstawił powiązanie technologii wytwarzania elementów przy zastosowaniu technologii przyrostowej DMLS (spiekanie laserowe, w tym przypadku stopu tytanu Ti6Al4V) z modyfikacją jej powierzchni. Modyfikacja polegała na naniesieniu na powierzchnie próbek odpowiedniej powłoki (AlTiN, TiAlN, TiSiN). Były one osadzone fizycznie z fazy gazowej PVD (Physical Vapour Deposition) w procesie rozpylania

magnetronowego. W identyczny sposób osadził powłoki na materiale podstawowym (Ti6Al4V) wykonanym z zastosowaniem standardowej technologii w produkcji prętów (obróbka plastyczna, obróbka cieplna – wyżarzanie). Pozwoliło to na określenie wpływu rodzaju podłoża na właściwości osadzanych powłok i wytypowanie najlepszej pod względem właściwości tribologicznych. W mojej ocenie zaproponowana technologia posiada niewątpliwą zaletę, jaką jest możliwość zabezpieczenia węzłów o skomplikowanej geometrii podlegających zużyciu poprzez tarcie. Autor trafnie jako przykład przywołuje budowę wielotrapezowych zamków łopatek turbin podatnych na fretting. Elementy te charakteryzują się zazwyczaj nietypowymi, skomplikowanymi krzywiznami. Wytworzenie takiego elementu przy zastosowaniu standardowych technologii, jak np. odlewanie czy obróbka ubytkowa jest trudne do wykonania, bardzo kosztowne i czasochłonne.

W mojej ocenie podjęta tematyka rozprawy jest bardzo aktualna i niezwykle interesująca, nie tylko ze względów poznawczych, ale również implementacyjnych. Wskazuje na to przegląd literatury oraz doniesienia w specjalistycznych periodykach naukowych. Uważam również, że zaproponowane w pracy rozwiązania są niezwykle ważne i wychodzą naprzeciw potrzebom przemysłu, które ciągle ewoluują. Obecnie technologie przyrostowe (wytwarzanie addytywne) takie jak: FDM, SLA, DLP, SLS, DMLS mają coraz większe znaczenie. Inwestują w nie i rozwijają największe gospodarki świata, co świadczy o ich bardzo dużym potencjale. Pozwalają na ograniczanie kosztów i czasu wytwarzania, a jednocześnie dają możliwość personalizacji wyrobu np. przy wytwarzaniu wyrobów stomatologicznych czy implantów ortopedycznych. Przywołane fakty potwierdzają słuszność podjęcia przez Doktoranta prac w ramach recenzowanej dysertacji.

### **Charakterystyka i struktura rozprawy**

Recenzowana rozprawa liczy 116 stron, w tym 11 rozdziałów wraz z podrozdziałami. Wnioski, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz bibliografia stanowią nieponumerowane rozdziały, co w mojej opinii jest właściwą praktyką. Wykaz oznaczeń i skrótów przedstawiono zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami, ale w mojej opinii brakuje jednostek przy oznaczeniach mierzalnych. Tylko w jednym przypadku przywołano jednostkę ( $H_T$  twardość indentacyjna [GPa]). Struktura pracy jest odpowiednia, bardzo czytelna i kompletna. Autor rozpoczyna od wstępu, w którym wprowadza czytelnika w poruszaną tematykę. Kolejną część to analiza stanu wiedzy. Obejmuje ona rozdziały od 1 do 6 wraz z podrozdziałami. W tej części Autor przedstawia stan wiedzy w zakresie charakterystyki laserowego spiekania proszków metali DMLS, stopu tytanu Ti6Al4V i modyfikacji powierzchni tych stopów (charakterystyka cienkich powłok ceramicznych, charakterystyka rozpylania magnetronowego).

W rozdziale 5 tej części Doktorant dokonuje podsumowania, które w mojej opinii jest trafne i właściwe. Przywołana literatura, analiza właściwości zastosowanych materiałów oraz wykorzystywanych technik świadczy o bardzo dobrej znajomości tematyki poruszanej przez doktoranta. Moje spostrzeżenie dotyczy nie tylko przywołania suchych faktów z publikacji naukowych, ale formułowania na podstawie przedstawionych w tych pracach wyników badań odpowiednich wniosków oraz spostrzeżeń. Jest to niezwykle ważna umiejętność.

Rozdział 6 to uzasadnienie podjęcia tematu badań, określenie celów oraz postawienie tezy pracy. Taka sentencja działań jest odpowiednia, ponieważ teza sformułowana na podstawie wcześniej przedstawionego uzasadnienia i postawionych celów jest kompletna.

Zdefiniowano dwa cele, pierwszy z nich to naukowy, drugi użyteczny. Są one następującej treści:

*„Celem naukowym jest określenie związku pomiędzy mikrostrukturą, morfologią i właściwościami mechanicznymi warstwy wierzchniej stopu Ti6Al4V spiekanej 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”.*

Opierając się o wyznaczone cele Autor sformułował i postawił, w mojej ocenie poprawną, tezę o następującej treści:

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

Następna część pracy to część eksperymentalna. Obejmuje swoim zakresem rozdziały od 7 do 11 wraz z podrozdziałami. Przedstawione w tej części pracy badania, wyniki badań, analiza merytoryczna oraz sformułowane wnioski pozwalają na weryfikację postawionej tezy. Autor w rozdziale 7 w bardzo czytelnej formie przedstawił zakres i metodykę badań (rysunek 11, str. 24). zilustrowane na drzewie eksperymentalnym powiązania pomiędzy poszczególnymi etapami są zrozumiałe i tworzą logiczny ciąg zaplanowanych działań. Następnie w pracy scharakteryzowano materiał podstawowy podłoża, jakim był stop tytanu Ti6Al4V (grade 5) uzyskany w dwóch procesach technologicznych. Pierwszy z nich wykonany został w tzw. technologii konwencjonalnej. Był to pręt po obróbce plastycznej o średnicy  $\varnothing 25$  mm, w stanie wyżarzonym. Drugi to krążki o średnicy  $\varnothing 32$  mm wytwarzane w technologii DMLS (Direct Metal Laser Sintering) z proszku spiekanej laserowo. Doktorant zastosował szereg metod badawczych. Były to: analiza strukturalna, badania profilometryczne, badania tribologiczne i mechaniczne, badania makroskopowych naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. W przypadku określenia właściwości nakładanych warstw AlTiN, TiAlN, TiSiN w procesie rozpylania magnetronowego wykonał: pomiary nanotwardości i modułu Younga, pomiary grubości powłok metodą wyszlifowania krateru, badania przyczepności powłok w próbie odporności na zarysowanie, badania przyczepności powłok w teście wciskania wgłębnika Rockwella C, badania odporności na zużycie przez tarcie w układzie kula – tarcza. Wszystkie przedstawił i szczegółowo opisał w rozdziale 9 (Metodyka badań). W mojej opinii opisy poszczególnych technik badawczych są kompletne. W zrozumiały sposób wyjaśniono zasady przeprowadzenia poszczególnych eksperymentów oraz wykonywanych pomiarów. Należy równocześnie podkreślić, że wykorzystane narzędzia i metody badawcze są adekwatne do poszukiwanych wielkości, które następnie poddane zostały analizie merytorycznej między innymi przy zastosowaniu analizy statystycznej. W rozdziale 10 Doktorant przedstawił wyniki badań własnych dla wszystkich zaplanowanych eksperymentów. Ich forma i jakość nie budzi moich zastrzeżeń. Wykresy, rysunki, tabele są czytelne i poprawnie sformatowane. Jednym z przykładów jest tabela 7 (strona 66) dotycząca porównania naprężeń wewnętrznych II stopnia warstwy wierzchniej podłoża oraz naniesionych powłok ceramicznych. Kolejny to rysunek 74 (strona 77) przedstawiający zarysowanie powłoki AlTiN na podłożu spiekany laserowo. Rozdział 11 to analiza wyników badań wraz z przeprowadzoną dyskusją. Po wnikliwej analizie tej części stwierdzam, że

Doktorant posiada umiejętności analizowania trudnych zagadnień przyczynowo – skutkowych. Pozostałe kwestie poruszane w tej części pracy zostaną omówione w punkcie związanym z oceną merytoryczną dysertacji. Następnie Autor formułuje trzynastę wniosków. Są one merytoryczne i wynikają z przeprowadzonych analiz. Kolejno umieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim. Pracę zamyka bibliografia, która składa się ze 110 pozycji. Jest różnorodna, zawiera zarówno aktualne artykuły naukowe, jak i inne wydawnictwa: normy oraz książki i monografie. Doktorant jest współautorem 8 zacytowanych źródeł literaturowych [38], [39], [40], [41], [42], [88], [91], [105]. Część z tych publikacji jest indeksowana na liście JCR.

### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko. Jest ona niezwykle interesująca biorąc pod uwagę tematykę badawczą, ale też uwzględniając aspekty naukowe i merytoryczne. Moją wysoką ocenę wzmacnia fakt, że uzyskane wyniki badań, poparte wieloma czasochłonnymi i złożonymi badaniami pozwoliły na wyciągnięcie wniosków, które wprost mogą być zaimplementowane w różnych sektorach przemysłowych.

Autor prawidłowo zdefiniował cele, a następnie realizował je w ramach opracowanego zakresu badań (rysunek 11). Pozwoliło to na uzyskanie wyników, które następnie poddano właściwej analizie merytorycznej i statystycznej. Na tej podstawie sformułowano odpowiednie wnioski. Należy podkreślić, że zaimplementowane metody badawcze są nowoczesne i zarazem odpowiednie do weryfikacji postawionej tezy. Część związaną z analizą stanu wiedzy oceniam bardzo dobrze, jednak nasunęły mi się pewne spostrzeżenia. W podrozdziale 4.2 Autor przedstawia charakterystykę rozpylania magnetronowego. Wskazuje na środowisko przeprowadzenia procesu jako próżnię (strona 18 i 19). Jest to oczywiście właściwe, niemniej jednak brakuje mi w tym miejscu podania zakresu wartości próżni (na stronie 28 podano wartość  $10^{-9}$  mbar). Wydaje się, że jest to istotny parametr. W tym samym podrozdziale Autor pisze o stosowanym rodzaju prądu przy osadzaniu. Wskazuje na prąd stały DC i przemienny AC (str. 20), co jest oczywiście prawdą. Wskazane byłoby w przypadku prądu stałego DC określenie, w jaki sposób podłączone są bieguny dodatni i ujemny. Analizując dalej rozdziały związane z częścią eksperymentalną (od 7 do 10), stwierdzam, że doktorant biegle odnajduje się w realizowanych badaniach, opisach i analizach. Jednocześnie wskazuje i wyjaśnia brak działań w obszarach, co do których można byłoby formułować pytania. Przykładem jest odpowiednie zaznaczenie, że modyfikacja parametrów zoptymalizowanych przez producenta jednostki roboczej do rozpylania magnetronowego nie jest przedmiotem badań dysertacji. Takie podejście jest w mojej ocenie słuszne. Doktorant wykonał próby dla typowych nastaw urządzenia, co pozwala na dość proste przeniesienie procesu w cykl produkcyjny. Pomiary nanotwardości i modułu Younga zostały opisane w zrozumiały sposób, choć w opisie rysunku 20 (strona 43) warto byłoby scharakteryzować wszystkie wielkości na nim umieszczone, w tym przypadku  $h_p$ ,  $h_c$ ,  $h_{max}$ ,  $\theta$ . Wskazaniem było by przywołanie odnośników literaturowych do wykorzystanych wartości współczynników Poisson'a dla konkretnych próbek, ponieważ nie są to wartości powszechnie znane (to uznać należy za przeoczenie niewpływające na bardzo wysoką ocenę pracy). Pomiary grubości powłok metodą wyszlifowania krateru wykonano przy zastosowaniu autorskiego urządzenia zaprojektowanego i wykonanego przez Doktoranta. Dotyczy to również badań pozwalających na wyznaczenie współczynnika tarcia. Autor pracy wykazuje w tym obszarze bardzo duże umiejętności, co w mojej ocenie jest bardzo dużą

wartością dodaną. Przedstawiane wielkości fizyczne i wzory w tej części pracy są czytelne, ale moim zdaniem brakuje przy większości z nich podanych jednostek. Należałoby to uzupełnić. Przykładem jest wzór 9 dotyczący obliczenia grubości powłoki „Sp” (strona 38). Wyniki badań prezentowane w rozdziale 10 przedstawione są w czytelnej formie. Przykładem może być tabela 3 opisująca wyniki pomiarów parametrów  $S_a$ ,  $S_q$  i  $S_{ku}$  dla badań profilometrycznych analizowanych próbek oraz dyfraktogramy rentgenowskie próbek określające składy fazowe (np. rysunki 44 i 45, strona 56). Pomiary naprężeń własnych (wewnętrznych II rzędu) - pomiar odległości między płaszczyznowych  $d_{hkl}$  w funkcji kąta  $\sin^2\psi$  wykonane dla różnych linii dyfrakcyjnych wykonano poprawnie. Wyniki przedstawiono w bardzo czytelnej formie (tabele, wykresy). Na stronie 65 Autor podaje, że naniesienie badanych powłok ceramicznych spowodowało obniżenie naprężeń ściskających podłoża w zakresie 11÷46%. Podany przedział jest dość szeroki. Warto byłoby to wyjaśnić. W przypadku badań nanotwardości analizowanych powłok Autor stwierdził duży rozrzut i niejednorodność, który spowodowany jest dużą powierzchnią rozwinięcia w skali nano. Z tego powodu wykonano porównanie niektórych wyników poprzez zastosowanie parametrycznej analizy statystycznej. Na jej podstawie stwierdzono podobieństwo rozkładu nanotwardości powłok AlTiN i TiAlN na poziomie  $p > 0,05$ , natomiast powłoki TiSiN posiadały wyraźnie większą twardość o ponad 20% i wyraźnie niższy moduł sprężystości od pozostałych próbek z naniesionymi powłokami. Zaproponowane podejście uważam za słuszne. Wskazuje to również na dużą świadomość Doktoranta co do wartości uzyskanych wyników pomiarów, ale również świadczy o znajomości i doborze właściwych testów statystycznych. Przykładem jest bardzo dobra statystyka pomiarów nanomechanicznych. Nie jest to oczywiste w obszarze, którego dotyczą badania. Wizualizacja uzyskanych efektów jest odpowiednia (tabele, wykresy). Przeprowadzone badania przyczepności powłok w próbie odporności na zarysowanie wykazały, że wszystkie powłoki rozpylane na podłożu spiekany laserowo charakteryzowały się o 25% wyższą odpornością na zarysowanie, niż te nałożone na stopie wytworzonym w konwencjonalnym procesie metalurgicznym. Wynika to bezpośrednio z przeprowadzonych analiz. Ciekawym badaniem było przeprowadzanie testu wciskania wgłębniaka Rockwella C wg normy VDI3198. Daje to możliwość poznania mechanizmów i zjawisk odpowiadających za zniszczenie, ale również jednoznacznie określa kryteria akceptacji (poziomu zniszczenia HF). Jest to niezwykle ważne z punktu widzenia przemysłowego, gdzie zazwyczaj wytwarzane wyroby muszą spełniać oczekiwania zleceniodawcy, a ten najczęściej przywołuje odpowiednie standardy przedmiotowe. Badania odporności na zużycie przez tarcie w układzie kula – tarcza wykazały, że podłoża Ti6Al4V spiekane laserowo charakteryzuje się słabszą odpornością na zużycie przez tarcie, niż wykonane w konwencjonalnym procesie metalurgicznym. Stwierdzono, że jest to efektem wad materiałowych w postaci porów, niepołączonych cząstek proszku i to wyjaśnienie jest trafne. Dodatkowo współczynnik tarcia ( $\mu=0,52$ ) dla stopu DMLS osiąga wyższe wartości, co prowadzi do zwiększenia współczynnika zużycia K (Autor stwierdza że ok. 15%). Jest to właściwa analiza, która potwierdza zdolności Doktoranta do logicznego wiązania ze sobą faktów. Analiza strukturalna badanych materiałów nie budzi moich zastrzeżeń: poprawnie określono mikrostruktury (fazy) dla dwóch materiałów podłoża. Pręt w stanie dostawy charakteryzuje się strukturami  $\alpha$ -Ti i  $\beta$ -Ti – struktura charakterystyczna dla Ti6Al4V (tytan grade 5). Podłoża uzyskane w procesie DMLS wykazuje jedną fazę  $\alpha'$ -Ti. (płytkowa struktura martenzytyczna). Faza ta została potwierdzona w badaniach przeprowadzonych na profilogramach uzyskanych na profilometrze optycznym. Moim zdaniem jest ona pochodną procesu wytwarzania, grubości ścianek oraz odległości od płyty bazowej. W swojej ocenie jestem zbieżny w tym zakresie

z Doktorantem. Należałoby jednak dystrybucję ciepła w tym procesie potraktować jako bardzo złożoną, ponieważ poza konwekcją duże znaczenie będzie tu miało przewodzenie zależne od np. zwiększenia grubości płyty i struktury podporowej o różnym wypełnieniu. W przyszłości warto byłoby określić, który z mechanizmów odgrywa większą rolę i jak się one zmieniają wraz z wymiarami geometrycznymi płyty, struktury podpory oraz wytwarzanego wyrobu. W tym przypadku dodatkowo należałoby wskazać, z jakim rodzajem konwekcji mamy do czynienia (swobodna czy wymuszona). Na podkreślenie zasługuje również jakość i czytelność pracy pod względem edycyjnym oraz graficznym. Pracę czyta się płynnie, pomimo niełatwej, skomplikowanej tematyki. W przypadku recenzowanej pracy do najważniejszych dokonań Doktoranta można zaliczyć:

1. Stwierdzenie na podstawie badań, że stan warstwy wierzchniej ma istotne znaczenie dla samej adhezji powłoki do podłoża. Z tego powodu powłoki PVD na podłożu spiekającym laserowo wykazywały znacznie lepsze właściwości adhezyjne. Wynikają one przede wszystkim z lepszego dopasowania  $E_{\text{powłoka}}/E_{\text{podłoże}}$  i wyższych naprężeń ściskających.
2. Udowodnienie, że zastosowanie powłok AlTiN i TiAlN pozwoliło na znaczną poprawę odporności na zużycie przez tarcie stopu Ti6Al4V. Określono na podstawie współczynnika zużycia K dla powierzchni z w/w powłokami, który zmniejszył się 600÷800 krotnie podczas testu w układzie kula – tarcza. Tu należy podkreślić, że takie stwierdzenie obowiązuje dla przyjętych warunków badań.

Pomimo bardzo dobrego odbioru pracy oraz wysokiej oceny pod względem merytorycznym w wyniku jej dokładnej analizy nasunęły mi się pewne spostrzeżenia i uwagi, które przedstawiam poniżej.

#### **Uwagi do recenzowanej rozprawy**

1. Na stronie 26 Autor przedstawia wyniki badań składu chemicznego tytanu Ti6Al4V. Powołuje się również na standardy ASTM F1472 i ASTM F2924. Skład chemiczny tytanu według nich określony jest głównymi pierwiastkami stopowymi, takimi jak tlen, azot oraz wodór. W tabeli 1 nie przedstawiono jednak tych pierwiastków. Co jest powodem takiej sytuacji?
2. Z pracy nie można w sposób jasny wywnioskować ile próbek zostało poddanych badaniu nanoindentacji z każdej konkretnej grupy, pomimo, że Autor podaje liczbę wykonywanych pomiarów (co najmniej 30 i co najmniej 60). Bez tej informacji czytelnik może wnioskować, iż jedynie jedna próbka została poddana co najmniej 30 pomiarom, a zatem  $n=1$ .
3. Autor używa stwierdzenia "uśrednione krzywe" (strona 66), co prawdopodobnie jest błędem, bowiem przedstawione krzywe nie są zapewne wynikową uśrednionych wartości, a przedstawiają pojedynczą krzywą odpowiadającą wartości średniej, np. maksymalnej głębokości.
4. Strona 69: przy opisie analizy zgodności rozkładu wyników badań metodą Shapiro-Wilka nie podano wyraźnie kryterium, czyli wartości parametru  $p=0,05$ .
5. Wykresy ramka-wąsy nie zostały przygotowane wg tych samych zasad, np. rysunek 70 i 73 sporządzono dla innych zakresów: wartości (1,96 i 2) odchylenia standardowego. To nie powoduje różnic w interpretacji wyników, ale formalnie powinno być przyjęte tak samo.

6. Rysunek 43, rysunki 74÷79a, rysunek 86 i rysunek 89 zostały przywołane w tekście w niewłaściwej kolejności. Rysunek 52 nie został przywołany w tekście.
7. Nie zachowano jednolitego sposobu oznaczania tabel (dwa rodzaje zapisu: Tab. i Tabela).
8. Dwie ostatnie pozycje: [109] i [110] ze spisu literatury nie zostały zacytowane.
9. W rozprawie stwierdziłem występowanie jedynie nielicznych błędów interpunkcyjnych oraz błędów językowych, np. (strona 6): „Patenty na tą technologię” (powinno być: „Patenty na tę technologię”).

Przedstawione uwagi i spostrzeżenia nie obniżają bardzo wysokiej wartości merytorycznej recenzowanej rozprawy. Jej lektura oraz analiza dostarcza wielu ciekawych informacji. Moim zdaniem zaproponowane rozwiązanie modyfikacji powierzchni poprzez rozpylanie magnetronowe stopu tytanu Ti6Al4V z uwzględnieniem rodzaju podłoża daje odpowiedź, które z rozwiązań jest właściwe mając na uwadze mechanizmy zużycia tribologicznego. To z kolei pozwoli przenieść przedstawione rozwiązanie na grunt przemysłowy.

### **Wniosek końcowy**

Recenzowana praca doktorska Pana mgr. inż. Kamila Pasierbiewicza pod tytułem „*Właściwości tribologiczne powłok ceramicznych nałożonych na laserowo spiekany stop tytanu*” wykonana pod opieką Promotora Pana dr. hab. inż. Mariusza Walczaka, prof. uczelni jest niezwykle interesująca i w mojej ocenie stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe. Jednocześnie uważam, że zastosowana technologia i przedstawione wyniki badań dają podstawę zaimplementowania zaproponowanego rozwiązania w warunkach przemysłowych. Postawiona teza została udowodniona poprzez wykonanie szerokiej gamy badań oraz właściwą i trafną analizę uzyskanych wyników. Doktorant udowodnił, że posiada umiejętności planowania badań, realizacji oraz analizowania i interpretowania uzyskanych wyników. Jednocześnie wykazuje umiejętność formułowania właściwych wniosków popartych dowodami naukowymi. Świadczy to o Jego dużym potencjale naukowym. Swoimi działaniami wykazał zdolność do prowadzenia prac badawczych. Dodatkowo wykazał umiejętność projektowania stanowisk badawczych, które wykorzystano w badaniach. Na podkreślenie zasługuje duża aktywność publikacyjna Doktoranta (również w renomowanych czasopismach naukowych) skutkująca wysokimi wartościami współczynników bibliometrycznych (indeks Hirscha wg WoS=6).

***Stwierdzam, że opiniowana praca doktorska spełnia w pełni wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z roku 2018 pozycja 1668) oraz wcześniejsze regulacje prawne (w szczególności Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku: tekst jednolity Dz. U. z 2016 r. poz. 882 ze zmianą: Dz. U. z 2016 r. poz. 1311). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej, Politechniki Lubelskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Kamila Pasierbiewicza do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.***

Sporządził



dr hab. inż. Grzegorz Rogalski, prof. PG