



Lublin, dn. 2024-07-31

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 06.08.2024  
RD JM a | RMT | 62 | 51 | 2024  
nr ..... zał. ....

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Pauliny Smolarczyk pt.:

**„Struktura i właściwości zmodyfikowanej Ti lub Ag warstwy wierzchniej miedzi w procesie stopowania laserowego”**

wykonanej pod opieką promotora Pana dr hab. inż. Mariusza Krupińskiego, prof. PŚ oraz promotora pomocniczego Pana dr inż. Przemysława Snopińskiego

Uwaga formalna

Opinię niniejszą opracowano na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, na podstawie przesłanego do mnie pisma Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej z dnia 09.07.2024 r.

**1. Charakterystyka i ocena formalna rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Smolarczyk przedstawiona została w postaci zwartego opracowania na 133 stronach formatu A4. Struktura opracowania nie odbiega od przyjętych standardów dla tego typu prac i została logicznie podzielona na 7 numerowanych rozdziałów. Pierwszy rozdział (wstęp) został poprzedzony spisem oznaczeń i skrótów odnoszących się m.in. do stosowanych w pracy metod badawczych oraz opisu właściwości materiałowych. We wstępie obejmującym 2 strony, Autorka zawiera wprowadzające informacje odnośnie obszarów aplikacji związanych z miedzią oraz zwraca uwagę na dynamicznie rozwijającą się gałąź technologii laserowych wykorzystywanych do modyfikacji powierzchni. Ponadto wskazuje na płynące zapotrzebowanie na prace umożliwiające rozszerzenie funkcjonalności oraz obszaru aplikacji wytwarzanych za jej pomocą elementów. Kolejny rozdział drugi obejmuje przegląd literatury, gdzie scharakteryzowano m.in. stopy Cu-Ti oraz Cu-Ag, omówiono mechanizmy umocnienia miedzi i jej stopów, przedstawiono informacje wprowadzające do opisu stopowania laserowego, a także wpływu technologii wysokoenergetycznych na wybrane właściwości miedzi ze szczególnym uwzględnieniem przewodności elektrycznej i cieplnej. Szkoda, że zabrakło zwartych w wypunktowanej formie

pewnych konkluzji z tego przeglądu literatury. Z kolei rozdział trzeci stanowi już część eksperymentalną, w której Doktorantka określa szeroki zakres prac umożliwiających osiągnięcie postawionego celu głównego oraz czterech celi badawczych, opisuje metodykę badawczą i charakteryzuje materiały użyte do badań oraz analizuje wybór parametrów technologicznych stopowania laserowego, - kolejno we właściwych podrozdziałach. W podrozdziale zatytułowanym „*Cel i teza pracy*” Autorka na podstawie podsumowania z przeprowadzonych studiów literaturowych i badań wstępnych formułuje tezę pracy. Teza i cel pracy postawione są jasno i w miarę poprawnie. Ponadto należy w tym miejscu podkreślić, że cel, zakres tematyczny i metodyka badawcza wskazane w rozprawie doktorskiej są dopasowane do dyscypliny *inżynieria materiałowa*. W rozdziale czwartym zamieszczono *wyniki badań* obejmujące: analizę strukturalną i fazową z osobna we właściwych podrozdziałach dla miedzi stopowanej tytanem i miedzi stopowanej srebrem oraz wyniki badań właściwości mechanicznych bazujących na pomiarach mikrotwardości i odporności na zużycie ściernie, a także właściwości fizycznych związanych z analizą konduktywności. Kolejny rozdział piąty - *podsumowanie* zrealizowany na niespełna sześciu stronach, stanowi swoiste zsyntezowanie najważniejszych treści wynikających z przeprowadzonych studiów literaturowych i kluczowych wyników badań eksperymentalnych. Część praktyczna pracy zakończona jest sformułowaniem 5 wniosków wynikających z przeprowadzonych prac badawczych i analiz. W dalszej części rozprawy, kolejno umieszczono rozdziały: siódmy obejmujący bibliografię oraz zamykające pracę (nienumerowane) streszczenie w języku polskim i angielskim.

Wykaz cytowanej literatury zawiera 195 pozycji i w ocenie recenzenta jest on wystarczający do wnikliwie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy w obszarze tematu rozprawy. Głównie jest to literatura zagraniczna z tzw. listy JCR. Przy czym ok. 38% (75/195) pozycji literatury jest nie starsza niż 5 lat (licząc od 2019 r.), a przesuwając granicę nieco dalej i licząc od 2015 r. – blisko 56% (109/195) cytowanych artykułów nie jest starszych niż 10 lat, co dodatkowo świadczy o tym, że podjęta w pracy tematyka badawcza jest aktualna i warta podejmowania dalszych badań w tym obszarze. Zaznaczyć należy przy tym, że wśród cytowanej literatury odnotowano dwie pozycje współautorskie Doktorantki (tj. poz. 65 i 112). Wszystkie pozycje wyszczególnione w bibliografii zostały przytoczone w treści pracy oraz we właściwy sposób dobrane zarówno w analizie stanu wiedzy, jak i w analizie wyników.

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

Tytuł przedstawionej rozprawy „*Struktura i właściwości zmodyfikowanej Ti lub Ag warstwy wierzchniej miedzi w procesie stopowania laserowego*” w pełni koresponduje z treścią zawartą w pracy.

Mimo na ogół bardzo starannej redakcji pracy, Doktorantka nie ustrzegła się pewnych niedociągnięć i nieścisłości. Niektóre sformułowania są użyte w pracy niezręcznie lub niewłaściwie, ale nie umniejszają one wartości rozprawy:

- 1) Autorka bezkrytycznie wielokrotnie zamiennie stosuje terminy do następujących określeń:
  - „*tribologia*” oraz „*trybologia*”, poprawnie powinno być tribologia jako pochodna słów greckich „*tribos*”- tarcie i „*logos*”- nauka;
  - „*własność*” oraz „*właściwość*” stosowane są zamiennie w pracy do określania tych samych cech – osobiście w tym przypadku jestem zwolennikiem konsekwentnego nazewnictwa nie wdając się przy tym w spór środowiskowy odnośnie prawidłowości powyższego terminu;
- 2) str. 11 jest „...*wysokiej ruchomości elektronów...*” poprawnie powinno być – „...*wysokiej ruchliwości elektronów...*”;
- 3) str. 25 jest „*Jeśli pierwiastek stopowy jest wystarczająco duży...*” poprawnie powinno być – „*Jeśli atom pierwiastka stopowego jest wystarczająco duży...*” również na tej samej stronie poniżej czytamy: *Jeśli pierwiastek stopowy jest wystarczająco mały...*” poprawnie powinno być – „*Jeśli atom pierwiastka stopowego jest wystarczająco mały...*”;
- 4) str. 45 czytamy „*Powierzchnię metali modyfikowano tlenkami lub węglkami i pomimo wzrostu właściwości warstwy wierzchniej po modyfikacji...*” – nieprecyzyjne stwierdzenie, nie wiadomo jakie właściwości miała na myśli Doktorantka;
- 5) Doktoranta wielokrotnie zamiennie w pracy używa spójników „i” oraz „lub” w opisach odnoszących się do „*modyfikacji warstwy wierzchniej miedzi tytanem lub srebrem*”, co w przypadku użycia łącznika „i” może niepoprawnie sugerować, że stopowanie warstwy wierzchniej realizowane było również z jednoczesnym użyciem obu pierwiastków;
- 6) str. 50 jest „*Analizę morfologii proszków i mikrostruktury miedzi MIE przed i po stopowaniu wykonano na mikroskopie skaningowym SUPRA 35 firmy ZEISS, przy napięciu przyspieszającym 20kV metodą elektronów wtórnych.*” poprawnie powinno być – „*Analizę morfologii proszków i mikrostruktury miedzi MIE przed i po stopowaniu wykonano na mikroskopie skaningowym SUPRA 35 firmy ZEISS, przy napięciu przyspieszającym 20kV przy użyciu detektora elektronów wtórnych elektronów wtórnych.*”
- 7) Doktorantka wielokrotnie w pracy odnosząc się do wyników twardości metodą Vickersa dla skali obciążenia HV0.1 używa określenia „*twardość przy małym obciążeniu*”, co jest

niepoprawne, gdyż wówczas mamy próbę mikrotwardości, a twardość przy małej sile obciążenia zarezerwowana jest dla skali HV0.2÷HV3;

8) str. 62, tabela 9 (kolumna druga, wiersz drugi) przy opisie kształtu proszku tytanu mamy – „ziarna” a poprawnie powinno być „*nieregularny ostrokrawedziowy*”;

9) niepoprawne podpisy na osi odciętych w przypadku rysunków odnoszących się do profilu śladu wytarcia po testach zużycia - dotyczy to rys. 67, rys. 68 oraz rys.69, gdzie mamy „*długość*” a powinno być „*szerokość*”;

10) str. 104 jest „*współczynniki rozszerzalności cieplnej*” powinno być „*współczynniki rozszerzalności cieplnej*”;

11) W bibliografii brak informacji o autorach przy pozycjach literatury: 81, 114, 126, 180 oraz informacji o nazwie wydawcy, przy czym powyższe braki Autorka rekompensuje przez podanie pełnych adresów stron internetowych lub nr DOI (Digital Object Identifier) czasopism, co ułatwia pełną identyfikację cytowanych pozycji literatury.

Mając na uwadze powyższe stwierdzenia, pod względem formalnym praca została opracowana poprawnie, jej struktura odpowiada przyjętym zasadom dla rozpraw doktorskich, a objętość wynika z potrzeby opisu przeprowadzenia obszernego programu badań.

## 2. Ocena merytoryczna pracy

W ostatnim czasie obserwuje się nieustający i dynamiczny rozwój technologii wykorzystywanych przez przemysł elektryczny i elektroniczny, energetykę, branżę motoryzacyjną oraz związane z tym zapotrzebowanie na podzespoły cierne charakteryzujące się wysoką przewodnością. Ze względu na wysoką przewodność cieplną i elektryczną, odporność na korozję oraz niski koszt produkcji, miedź oraz jej stopy stanowią popularne zastosowanie na elektryczne styki ślizgowe, pantografy, komutatory czy pierścienie ślizgowe w satelitach. Jednak ich głównymi wadami są przede wszystkim niska twardość i odporność na zużycie. Dlatego też, miedź bardzo często poddawana jest różnym modyfikacjom, związanym ze stopowaniem powierzchniowym. Autorka rozprawy wskazuje, że znaczącą poprawę twardości i wzrost odporności na zużycie ściernie przy zachowaniu niezmiennych właściwości materiału podłoża można uzyskać stosując powierzchniowe wysokoenergetyczne technologie kształtowania warstwy wierzchniej metali. Jako jedno z najlepszych rozwiązań wskazuje - laserowe stopowanie powierzchni m.in. ze względu na unikalne cechy obejmujące minimalny efekt cieplny, dostosowany do indywidualnych potrzeb skład powierzchni i silne wiązanie metalurgiczne pomiędzy warstwą stopu a podłożem. Doktorantka w części przeglądowej pracy zwraca uwagę, że typowe pierwiastki stopowe stosowane do modyfikacji miedzi, często wpływają korzystnie na poprawę właściwości mechanicznych,

ale kosztem obniżenia konduktywności. Niewątpliwie właściwości i mikrostruktura laserowo stopowanych warstw zależą od doboru pierwiastków stopowych i rozkładu składu. Na podstawie wnikliwie przeprowadzonej analizy literatury wydaje się, że dość obiecujące właściwości mechaniczne przy zachowaniu odpowiednio wysokiego poziomu przewodności elektrycznej można uzyskać przy modyfikacji warstwy wierzchniej miedzi z użyciem czystych proszków tytanu lub srebra. O ile konwencjonalne stopy Cu-Ti oraz Cu-Ag wydają się przebadane, to dla materiałów modyfikowanych powierzchniowo przy użyciu lasera nie ma jeszcze w pełni określonych charakterystyk materiałowych. Wprawdzie dotychczas dostępne są w literaturze opracowania dla laserowo stopowanych powierzchni miedzi z użyciem proszku tytanu, to dotyczą one jedynie określonej wąskiej grupy właściwości i to w ograniczonym zakresie. Poszerzenie wiedzy z zakresu charakterystyk materiałowych dotyczących stopowania powierzchni miedzi proszkami srebra z użyciem lasera włóknowego, pod tym względem można uznać za dość unikatowe, gdyż obejmują jedynie prace Autorki i Promotora rozprawy. Stąd wynikała m.in. potrzeba badań podjętych w powyższym obszarze. Doktorantka odnajduje więc lukę, dotyczącą braku informacji na ten temat. Jak wskazuje Autorka rozprawy w uzasadnieniu (patrz rozdz. 3.1) - *„tytan tworząc fazy międzymetaliczne może powodować umocnienie miedzi, blokowanie ruchu dyslokacji, nie wywołując nadmiernych naprężeń czy deformacji osnowy miedzi. Dodatkowo poprzez kontrolę składu chemicznego i ograniczanie rozpuszczania tytanu w osnowie miedzi możliwe jest zachowanie wysokiej przewodności elektrycznej. Pierwiastki stopowe takie jak tytan w miedzi, mogą prowadzić do zwiększonej spójności i wytrzymałości granic ziaren. Zastosowanie srebra w celu modyfikacji powierzchni miedzi wpływa na przewodność cieplną materiału, co rozszerza jej aplikacyjność do zastosowań związanych z rozpraszaniem ciepła czy pracy w podwyższonych temperaturach ze względu na odporność na pełzanie. Tak samo jak w przypadku tytanu, dodatek srebra w miedzi może utrudniać ruch dyslokacji”*. Tematykę badań uważam za aktualną i istotną nie tylko z naukowego punktu widzenia ale również utylitarne, gdzie uzyskane wyniki badań strukturalnych, przewodności elektrycznej oraz charakterystyki zużycia tribologicznego mogą stanowić cenną informację dla konstruktorów i technologów przy doborze materiałów na podzespoły cierne wymagające wysokiej przewodności. Dlatego też wybór tematyki pracy jest w pełni uzasadniony, a sformułowanie tematu rozprawy poprawne.

Na podstawie analizy stanu wiedzy Doktorantka sformułowała cel pracy:

*„Celem pracy było zbadanie możliwości modyfikacji składu chemicznego warstwy powierzchniowej miedzi, z zastosowaniem lasera włóknowego Ytterbium Laser System YLS-4000-S2T oraz proszków metali przejściowych – Ti i Ag oraz analiza wpływu parametrów stopowania na powstawanie strefy przetopienia (RZ), strefy dyfuzyjnej (DZ) oraz strefy*

wplywu ciepła (HAZ), a także zbadanie wplywu parametrów stopowania laserem włóknowym oraz rodzaju i stężenia atomowego proszków Ti i Ag na zmianę struktury w strefie przetopienia, a tym samym twardości i odporności na ścieranie oraz konduktywności.”

oraz przyjęła następującą tezę:

*„Krystalizacja modyfikowanej chemicznie proszkami Ti oraz Ag strefy przetopienia (RZ) w procesie stopowania laserowego, umożliwi kształtowanie struktury warstwy powierzchniowej miedzi, poprzez sterowanie składem chemicznym i możliwym udziałem wzmacniających faz międzymetalicznych bądź eutektyk, a tym samym umożliwi wytworzenie warstw powierzchniowych charakteryzujących się wysoką twardością oraz odpornością na zużycie ścierne przy ograniczonym obniżeniu konduktywności.”*

Przedstawione przez Doktorantkę cel i tezę uważam za właściwe, sformułowane w mirę jasno i klarownie. Przy czym w celu można było sobie darować podanie konkretnego modelu lasera, a teza pomimo poprawnego sformułowania, jest rozbudowana i przez to może wydawać się nieco zawiła i można byłoby skrócić jej treść bez utraty zasadności do następującego brzmienia:

*„Krystalizacja modyfikowanej chemicznie proszkami Ti oraz Ag strefy przetopienia (RZ) w procesie stopowania laserowego, umożliwi kształtowanie struktury warstwy powierzchniowej miedzi, poprzez sterowanie składem chemicznym i fazowym, co umożliwi wytworzenie warstw powierzchniowych charakteryzujących się wysoką twardością oraz odpornością na zużycie ścierne przy ograniczonym obniżeniu konduktywności.”*

Przedmiot badań stanowiło podłoże z miedzi elektrolitycznej M1E o stopniu utwardzenia z4, które poddano stopowaniu laserowemu proszkami tytanu oraz srebra.

Doktorantka właściwie zaplanowała i zrealizowała program badań. Dla osiągnięcia celu i udowodnienia tezy wykorzystwała szerokie spektrum metod badawczych obejmujących m.in. stanowiskowe procesy laserowego stopowania powierzchni, stykowe pomiary profilometryczne powierzchni, mikroskopię świetną, analizę orientacji krystalograficznych ziaren EBSD, rentgenowską analizę fazową XRD, mikroskopową analizę TEM i SEM połączone z analizą składu chemicznego EDS, pomiary twardości metodą Vickersa, badania zużycia metodą ball-on-plate i badania konduktywności. Metodologia badań i zrealizowany program jest dobrze opisany i świadczy o szerokiej wiedzy oraz bardzo dobrym przygotowaniu Doktorantki w obszarze współczesnych metod pomiarowych i planowania eksperymentu. Wykonano wnikliwie i czasochłonne analizy związane z doбором optymalnych parametrów technologicznych stopowania w oparciu o prędkość podawania proszku oraz mocy lasera poparte ciekawymi graficznymi zestawieniami. Obszerne i kompleksowe badania stref: przetopienia, dyfuzyjnej oraz wplywu ciepła, a także charakterystyka modyfikowanych powierzchni poparte zostały licznymi zdjęciami

mikrostruktur i wykresami, które stanowią silną stronę tej rozprawy, na podstawie, których Autorka dokonała m.in. starannej oceny zjawisk zachodzących w wyniku procesów laserowego stopowania. Również analiza procesów zniszczenia oraz identyfikacji mechanizmów uszkodzenia powierzchni po testach tribologicznych została udokumentowana licznymi dobrej jakości zdjęciami SEM i profilami poprzecznych śladów wytarcia, co dodatkowo podwyższa walory edycyjne recenzowanej pracy. Przy czym szkoda, że podczas identyfikacji mechanizmów zużycia, ślady wytarcia po testach nie poddano dodatkowo analizie EDS celem weryfikacji czy nie zachodzi równolegle zużycie utleniające. Pewien niedosyt stanowi również fakt, że w pracy nie zamieszczono charakterystyk współczynników tarcia, które są generowane niemal bezpośrednio podczas testów na tribotesterze firmy CSM Instruments. Niewątpliwie stanowiłyby one wartością dodaną z analizy wyników zużycia ściernego i wpisywałyby się w kompletną charakterystykę tribologiczną badanych powierzchni.

Generalnie Doktorantka w sposób biegły i dojrzały prowadzi analizę oraz dyskusję wyników. Niestety, w części poświęconej dyskusji - podsumowaniu (rozdział 7) czuje się pewien niedosyt, w szczególności zabrakło mi naukowej dyskusji wyników i zestawienia badań własności mechanicznych w konfrontacji z już dostępnymi w literaturze modyfikacjami powierzchni Ti, Cr, Be czy Mo. Dodatkowo w podsumowaniu wskazuje na potrzebę kontynuacji i kierunki przyszłych badań, które mogą być z powodzeniem rozwijane w dalszych pracach Autorki i zespołu pod kierunkiem Promotora rozprawy.

Całość pracy dopełnia 5 wniosków z przeprowadzonych badań, które zasadniczo dobrze się komponują z postawioną tezą i celem pracy. Przy czym w tym miejscu należy zauważyć, że wniosek drugi odnoszący się do doboru optymalnych parametrów procesu laserowego stopowania w tak sformułowany brzmi zbyt ogólnie. W ocenie recenzenta bardziej zasadnym byłoby zasygnalizowanie kluczowych wyników z tej optymalizacji np.: *Najbardziej powtarzalne i korzystne powierzchnie pod względem właściwości stereometrycznych oraz jednorodnego składu chemicznego w strefie przetopienia uzyskano dla prędkości podawania proszku 0,1 l/min oraz mocy lasera 2 kW dla powierzchni stopowanych Ti, natomiast dla powierzchni stopowanych Ag uzyskano dla prędkości podawania proszku 0,15 l/min oraz mocy lasera 2,5 kW.* Ponadto wniosek piąty można by rozdzielić na dwa osobne, jeden odnoszący się do właściwości mechanicznych a drugi do konduktywności.

Podsumowując rozprawa jest oryginalna i ma charakter przede wszystkim poznawczy, ponieważ wnosi nowe elementy do wiedzy o właściwościach modyfikowanej powierzchniowo miedzi jak i niewątpliwie aplikacyjny, polegający na opracowaniu optymalnych parametrów procesu laserowego stopowania miedzi z użyciem lasera włóknowego, z dużym powodzeniem pozwalającym na zastosowanie przy wytwarzaniu podzespołów ciernych wymagających wysokiej przewodności.

### Do najważniejszych osiągnięć pracy doktorskiej należą (tzw. mocne strony pracy):

1. Atutem pracy jest opracowanie optymalnych warunków technologicznych dla procesu laserowego stopowania powierzchni miedzi proszkami Ti oraz Ag z wykorzystaniem lasera włóknowego.
2. Bardzo szeroki i komplementarny zakres badań związanych z oceną właściwości materiałowych tj. struktury składu chemicznego i fazowego oraz czynników mających wpływ na właściwości mechaniczne oraz przewodność elektryczną badanych nowatorskich modyfikowanych powierzchni miedzi, z wykorzystaniem nowoczesnych technik i metod badawczych takich jak: mikroskopia świetlna, elektronowa mikroskopia skaningowa wraz z dyfrakcją elektronów wstecznie rozproszonych, rentgenowska analiza fazowa, oraz elektronowa mikroskopia transmisyjna. Co jest zauważalnym uzupełnieniem i rozszerzeniem aktualnego stanu wiedzy obejmującym przede wszystkim zagadnienia inżynierii powierzchni bardzo dobrze wpisujące się w dyscyplinę - inżynieria materiałowa.
3. Poszerzenie wiedzy z obszaru inżynierii powierzchni dotyczący stopowania powierzchni miedzi proszkami srebra z użyciem lasera włóknowego, pod tym względem można uznać za oryginalne, gdyż obejmują jedynie prace Autorki i Promotora rozprawy.

### 3. Uwagi, wątpliwości i zapytania

Pomimo dobrego odbioru pracy oraz pozytywnej oceny pod względem merytorycznym, podczas zapoznawania się z treścią rozprawy nasunęły mi się pewne pytania i uwagi.

Proszę o ustosunkowanie się do wyszczególnionych poniżej:

1. Na stronie 54 w Tabeli 8 dotyczącej zestawienia parametrów testu zużycia ball-on-plate podano, że *max prędkość liniowa* wynosiła 2 cm/s. Stąd też, kieruje zapytanie do Doktorantki, czy badania prowadzone były ze zmienną prędkością liniową i czy przy tego rodzaju testach nie należałoby podać raczej średniej wartości prędkości?
2. Na stronie 76 przy analizie EDS pomięto identyfikację fazy dla punktu pomiarowego #5. Mając na uwadze układ równowagi faz Cu-Ti (rys. 6, str. 14) oraz uzyskane w tym punkcie stężenie atomowe badanych pierwiastków może również wskazywać na możliwość wystąpienia fazy Cu<sub>4</sub>Ti.
3. Z opisu prezentacji wyników pomiarów falistości powierzchni można odnieść wrażenie, że przeprowadzono je tylko w jednym miejscu (na płaszczyźnie oznaczonej #Y) a nie w kilku. W opisie profilu falistości (rys. 34 oraz rys. 50) brak jest charakterystycznych parametrów



- falistości ( $W$ ) oraz informacji o rozrzucie wyników. Zatem jaka jest pewność, że wytypowane miejsce jest reprezentatywne dla całej powierzchni?
4. Na stronie 95 w opisie wyników pomiarów twardości dla czystej miedzi M1E, podano średnią twardość na poziomie  $100\text{HV}_{0.1}$  co nie jest do końca zgodne z prezentacją graficzną wyników twardości rys. 64, gdzie wyniki wskazują na średnią twardość na poziomie  $110\text{HV}_{0.1}$ , te rozbieżności są również powielane przy zestawieniu zbiorczym zmierzonych właściwości na str. 106 rys. 77. Ponadto analiza zmian twardości wyrażona w procentach również nie jest precyzyjna. Doktorantka na str. 95 podaje: „Miedź M1E charakteryzowała się najmniejszym odchyleniem standardowym, największe odchylenie standardowe zaobserwowano przy materiale stopowanym tytanem, który wykazał wzrost twardości o 234%. W przypadku materiału stopowanego srebrem wzrost twardości odnotowano o 155 %.” Jeżeli uwzględnić dla czystej miedzi M1E średnią twardość na poziomie  $100\text{HV}_{0.1}$  za poprawną, to wzrost twardości dla powierzchni stopowanych Ag wynosi co najwyżej 55%, a dla powierzchni modyfikowanych Ti 134%. Proszę o komentarz.
  5. W pracy wymagane jest wytłumaczenie pewnej niespójności tj. - na str. 63 odnajdujemy następującą informację: „Wstępnie przeanalizowano wpływ prędkości podawania proszku oraz mocy lasera na powierzchnię miedzi po stopowaniu Ti oraz Ag tj. udział porów, zmianę geometrii próbki oraz nieciągłość ściągów.” i dalej Doktorantka podaje optymalne parametry odnośnie prędkości podawania proszku i mocy lasera. Z kolei dwie strony dalej (str. 65) Doktoranta zamieszcza informacje - „Na podstawie wstępnej analizy porównawczej właściwości mechanicznych, tj. twardości i odporności na ścieranie oraz stężenia masowego pierwiastków w strefie przetopienia wybrano najlepsze parametry stopowania.” Proszę odpowiedzieć, to co w końcu było kluczowe dla doboru optymalnych parametrów technologicznych: jakość powierzchni czy właściwości mechaniczne? Szkoda, że nie zamieszczono w pracy nawet krótkiej informacji jaki wpływ (trend) miała odpowiednio weryfikacja parametrów technologicznych na powyższe właściwości mechaniczne.
  6. Proszę wyjaśnić jak się ma dokładność pomiarów zużycia na podstawie profili śladów wytarcia mając na uwadze fakt, że uśrednione wartości dolin i wierzchołków (już po splanowaniu) dla powierzchni stopowanej Ti zawierają się w przedziale  $-3\div 3\ \mu\text{m}$  (rys. 65, str. 96), a średnia głębokość śladu wytarcia po testach zużycia wynosi ok.  $-0,5\ \mu\text{m}$  (rys. 68, str. 98). Podobnie sytuacja wygląda w przypadku powierzchni stopowanej Ag, dla której uśredniony profil chropowatości zawiera się w przedziale  $-7\div 10,5\ \mu\text{m}$  (rys. 66, str. 97), a średnia głębokość śladu wytarcia po testach zużycia wynosi ok.  $-1,4\ \mu\text{m}$  (rys. 69, str. 98).

7. Autorka rozprawy wskazuje przy identyfikacji mechanizmów zużycia m.in. na zużycie ściernie, adhezyjne i zmęczeniowe. Mając na uwadze prezentowany materiał graficzny ze śladów zużycia po testach tribologicznych tj. rys. 70a i rys. 74a oraz fakt, że Cu, Ag i Ti wykazują tendencję do utleniania, kieruję pytanie do Doktorantki, czy możliwe jest występowanie również równoległe zużycia utleniającego?
8. Na str. 102 rys. 76 przedstawiono wyniki badań konduktywności w „niezbyt trafionej” formie graficznej, gdzie punkty pomiarowe odpowiadające pomiarom w 20 miejscach połączono ze sobą. Z kolei łączenie punktów pomiarowych miałyby sens, w przypadku pomiarów na przekroju poprzecznym w głąb materiału podłoża (powierzchnia #X). Bardziej reprezentatywnym statystycznie w tym przypadku byłby wykres ramka-wąsy. Dlatego mając na uwadze uzyskane korzystne wyniki wskazujące na spadek konduktywności jedynie o 3,5% i 6% odpowiednio dla miedzi modyfikowanej Ti i Ag, kieruje pytanie do Doktorantki czy uzyskane zmiany są istotne statystycznie?

W tym miejscu chciałbym zaznaczyć, że powyższe pytania oraz uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o recenzowanej pracy doktorskiej Pani mgr inż. Pauliny Smolarczyk, a praca dotyczy zagadnień związanych z dyscypliną - *inżynieria materiałowa*.

#### 4. Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Pani mgr inż. Paulina Smolarczyk w przedłożonej rozprawie doktorskiej zrealizowała obszerny i ciekawy program badawczy. Uzyskane wyniki są **oryginalne i zawierają elementy nowości**. Doktorantka wykazała się 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 dobrym poziomie merytorycznym.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska

Pani mgr inż. Pauliny Smolarczyk

pt.: „*Struktura i właściwości zmodyfikowanej Ti lub Ag warstwy wierzchniej miedzi w procesie stopowania laserowego*”

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. Nr 65, poz. 595) z późn. zm. W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy mgr inż. Pauliny Smolarczyk i dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony w dyscyplinie *inżynieria materiałowa*.

