

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Grzegorz Maciaszek

pod tytułem:

Analiza wpływu parametrów procesu fizycznego osadzania z fazy gazowej z odparowaniem za pomocą wiązki elektronów EB-PVD na właściwości użytkowe powłokowej bariery cieplnej TBC osadzonej na podłożu z nadstopu niklu

przygotowanej pod kierunkiem:

dr hab. inż. Andrzej Nowotnik, prof. PRz

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Rzeszowskiej.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.).

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

- 1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- 2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
- 3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Uwagi ogólne

Opiniowana praca powstała pod opieką dr hab. inż. Andrzeja Nowotnika, prof. PRz., na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej w Katedrze Nauki o Materiałach gdzie od lat prowadzone są m. in. badania aplikacyjne nad rozwiązaniami materiałowymi i technologiami we współpracy z przemysłem. Recenzowana praca wpisuje się doskonale w nurt prac badawczych tej Katedry, w ramach której funkcjonuje Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego prowadzące badania nad opracowaniem nowych rozwiązań w obszarze innowacyjnych materiałów i technologii dla lotnictwa.

Badania przeprowadzone przez mgr inż. Grzegorza Maciaszka w ramach doktoratu mają charakter interdyscyplinarny. Obejmują one zarówno badania podstawowe, jak i przemysłowe oraz rozwojowe, z wyraźnym utylitarnym aspektem. Badania skoncentrowane są na optymalizację procesu nanoszenia powłokowej bariery cieplnej TBC (z ang. *Thermal Barrier Coating*) stanowiącej efektywny sposób obniżenia temperatury podłoża części gorącej strefy turbinowych silników lotniczych, odpowiadając za podwyższenie ich trwałości i sprawności.

Ze względu na możliwość dalszego podwyższania temperatury strumienia gazów, konieczne jest wciąż realizowanie badań zmierzających do modyfikowania parametrów procesu osadzania z fazy gazowej za pomocą wiązki elektronów EB-PVD barier TBC gwarantujących uzyskanie powłok charakteryzujących się wyższą, od dotychczasowej, trwałością

w warunkach oddziaływania dynamicznego strumienia gorących gazów i sił odśrodkowych. W celu dalszego podwyższania właściwości użytkowych powłok wytwarzanych w procesie EB-PVD, kluczowe jest zrozumienie wpływu parametrów tego procesu na mikrostrukturę i przyczepność powłoki ceramicznej do podłoża.

Autor dysertacji skupił się głównie na analizie stanu powierzchni międzywarstwy, która determinuje właściwości adhezyjne ceramicznej powłoki do podłoża. Dodatkowo poddał badaniom wpływ parametrów procesu EB-PVD, takich jak: prąd emisji wiązki, temperatura podłoża oraz ciśnienie w komorze roboczej. Mają one istotne znaczenie w kształtowaniu mikrostruktury powłoki ceramicznej, a tym samym na jej właściwości fizyczne i mechaniczne.

Należy podkreślić, że Doktorant przeprowadził badania w warunkach zbliżonych do procesów produkcyjnych co znacząco sprzyja optymalizacji procesu EB-PVD i wdrożeniu do przemysłu powłokowych barier cieplnych o ulepszonych właściwościach eksploatacyjnych. Ponadto, możliwość korzystania z nowoczesnych, przemysłowych urządzeń badawczych zapewnia pełną kontrolę nad parametrami procesu osadzania powłok oraz powtarzalność i odgrywa kluczową rolę w realizacji badań aplikacyjnych.

Z przeprowadzonej przez Doktoranta analizy literatury wynika, że brak jest badań, które w sposób kompleksowy opisują i charakteryzują wpływ kluczowych parametrów procesu EB-PVD na właściwości powłokowych barier cieplnych. Większość dotychczasowych prac badawczych koncentrowała się na wybranych aspektach procesu, nie uwzględniając w pełni interakcji pomiędzy takimi parametrami jak: prąd emisji, jakość powierzchni podłoża, temperatura i ciśnienie w komorze roboczej.

Doktorant postawił sobie za cel wypełnienie tej luki, tzn. określenie warunków procesu umożliwiających uzyskanie najlepszych właściwości mechanicznych i fizycznych powłok. Dobór parametrów procesu EB-PVD prowadził pod kątem jednoznacznej oceny wpływu badanego parametru na właściwości powłokowej bariery cieplnej, przy jednoczesnym utrzymaniu pozostałych parametrów na stałym poziomie.

Rezultatem przeprowadzonych przez Doktoranta badań było określenie parametrów procesu EB-PVD oraz stanu powierzchni międzywarstwy na jakość i właściwości użytkowe powłokowych barier cieplnych z ceramiczną warstwą wierzchnią wykonaną z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru.

Należy zwrócić uwagę, że zainteresowanie prowadzonymi przez Doktoranta badaniami wyraziły wiodące firmy zajmujące się produkcją silników lotniczych oraz wytwarzaniem powłok TBC, tzw. OEM'y (z ang. *Original Equipment Manufacturer*), tj. Ceramic Coating Center Joint Venture firm SAFRAN i MTU, Honeywell, Pratt&Whitney USA i Kanada, IHI Japonia, Oerlikon USA, Turbine Surface Technologies TSTL USA oraz Praxair.

Recenzowana praca dotyczy, moim zdaniem, zagadnień o istotnej wartości poznawczej i przede wszystkim aplikacyjnej. Podjęto w niej bardzo istotny z punktu widzenia technologii materiałów wątek badawczy – optymalizację procesu technologii nanoszenia powłokowej bariery cieplnej TBC osadzonej na podłożu z nadstopu niklu.

Uwagi redakcyjne

Recenzowana dysertacja jest kompletna i napisana w sposób komunikatywny. Ma ona klasyczny układ i została podzielona na następujące główne rozdziały: *Studium Literaturowe, Podsumowanie stanu zagadnienia–Cel Pracy, Badania Własne, Wyniki Badań i ich Analiza oraz Podsumowanie.*

W rozdziale *Studium Literaturowe* Doktorant przedstawił aktualny stan wiedzy w obszarze technologii nanoszenia powłokowych barier cieplnych. W następnym rozdziale dokonał podsumowania przeglądu literaturowego oraz sformułował cel pracy. W rozdziale *Badania Własne* opisał materiał i metodykę badań zaplanowanych do wykonania w ramach rozprawy doktorskiej. W dalszej części rozprawy szczegółowo przedstawił wyniki przeprowadzonych badań i poddał je wnikliwej analizie. Konkluzje wynikające z otrzymanych wyników badań Doktorant przedstawił w rozdziale *Podsumowanie*.

Pracę czyta się z dużym zainteresowaniem tym bardziej, że jest ona napisana poprawnie pod względem językowym i praktycznie nie zawiera błędów redakcyjnych. Na uwagę zasługują trafnie dobrane i aktualne powołania literaturowe (134 pozycji).

Teza, cel i zakres pracy

Z przeprowadzonej przez Doktoranta analizy aktualnego stanu wiedzy wynika, że brak jest wyników badań, które w sposób kompleksowy opisują i charakteryzują wpływ kluczowych parametrów procesu EB-PVD na właściwości powłokowych barier cieplnych. Dotychczasowe prace koncentrowały się głównie na kilku parametrach procesu, nie uwzględniając w pełni wzajemnej relacji pomiędzy takimi parametrami jak: prąd emisji, jakość powierzchni podłoża, temperatura w trakcie wzrostu powłoki ceramicznej i ciśnienie w komorze roboczej.

Autor rozprawy zidentyfikował również brak danych określających w sposób jednoznaczny wpływ warunków procesów obróbki mechanicznej powierzchni podłoża metalicznego na przyczepność powłok ceramicznych wytwarzanych metodą EB-PVD. Doktorant wskazał na konieczność przeprowadzenia badań umożliwiających szczegółowy opis zjawisk determinujących wpływ stanu warstwy wierzchniej elementów przeznaczonych do pokrycia materiałem ceramicznym oraz parametry procesu osadzania na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne powłok TBC.

Mgr inż. Grzegorz Maciaszek wykazał również, na podstawie dostępnych źródeł literaturowych, że brak jest badań prowadzonych w warunkach zbliżonych do procesów produkcyjnych, co znacząco ogranicza możliwość dalszej optymalizacji procesu EB-PVD oraz wdrażania powłokowych barier cieplnych o ulepszonych właściwościach eksploatacyjnych do przemysłu. Podkreślił również, że możliwość korzystania z nowoczesnych, przemysłowych urządzeń badawczych zapewniłoby lepszą kontrolę nad parametrami procesu osadzania powłok oraz powtarzalność, tak kluczowymi w realizacji wdrożeń tej technologii dla przemysłu lotniczego.

Doktorant wskazał także na lukę w ocenie wpływu parametrów prądowo-napięciowych, ciśnienia gazów procesowych oraz temperatury procesu na jakość wytwarzanych powłok. Podkreślił, że istotnym zagadnieniem jest możliwość skrócenia czasu procesu osadzania, co bezpośrednio przekłada się na redukcję kosztów produkcji powłok TBS. Optymalizacja warunków tego procesu oraz odpowiednie przygotowanie podłoża poprzez obróbkę mechaniczną, tuż przed procesem EB-PVD, mogą dodatkowo korzystnie wpływać na mikrostrukturę wytwarzanych powłok, co ma istotne znaczenie dla ich właściwości użytkowych.

Zidentyfikowane przez Doktoranta braki w opisie wpływu stanu powierzchni międzywarstwy i parametrów procesu EB-PVD, realizowanego na urządzeniach przemysłowych, na właściwości użytkowe powłokowej bariery cieplnej TBC osadzonej na podłożu z nadstopu niklu, pozwoliły Mu na sformułowanie następującej tezy badawczej:

„Parametry procesu EB-PVD, w tym prąd emisji wiązki elektronów oraz ciśnienie w komorze roboczej, jak i również stan powierzchni międzywarstwy determinowany parametrem Ra, kształtują morfologię i mikrostrukturę powłoki ceramicznej, wpływając na jej przyczepność do podłoża oraz odporność na degradację w warunkach cyklicznej zmiany temperatury i naprężeń wewnętrznych. Tym samym determinują właściwości użytkowe powłokowych barier cieplnych oraz ich trwałość podczas eksploatacji”.

Należy podkreślić, że badania przeprowadzone przez Doktoranta zostały zrealizowane przy użyciu przemysłowego urządzenia SMART COATER stanowiącego wyposażenie Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Weryfikacja postawionej tezy oparta została na realizacji celu pracy – określenia warunków procesu umożliwiających uzyskanie najlepszych właściwości mechanicznych i fizycznych powłok TBC osadzanych na podłożu ze stopu niklu.

Doktorant dokonał doboru parametrów procesu EB-PVD tak aby jednoznacznie ocenić wpływ badanego parametru na właściwości powłokowej bariery cieplnej, przy jednoczesnym utrzymaniu pozostałych parametrów na stałym poziomie. Zaplanował wykonanie analizy wpływu stanu powierzchni międzywarstwy oraz kluczowych parametrów procesu, takich jak prąd emisji i ciśnienie w komorze roboczej, na morfologię wytworzonej powłoki ceramicznej.

Koncepcja dowodzenia tezy przyjęta przez Doktoranta zakłada przeprowadzenie badań obejmujących kilka etapów:

- „identyfikacja kluczowych czynników determinujących właściwości użytkowe powłokowych barier cieplnych oraz opracowanie parametrów procesu osadzania powłoki ceramicznej,
- ocena wpływu wybranych parametrów procesu EB-PVD na przyrost masy próbek spowodowany wytworzeniem powłoki,
- analiza wpływu parametrów procesowych na grubość powłok ceramicznych,
- określenie wpływu stanu powierzchni międzywarstwy na chropowatość powłok TBC,
- badania wpływu stanu powierzchni międzywarstwy, prądu emisji wiązki elektronów oraz ciśnienia w komorze procesowej na mikrostrukturę oraz skład chemiczny powłok ceramicznych,
- ocena wpływu parametrów procesu EB-PVD na przyczepności powłok TBC,
- badania wpływu cyklicznych obciążeń cieplnych na przyczepność powłok ceramicznych”.

Realizację zadań badawczych Doktorant oparł o analizę mikrostruktury powłok (SEM), badania przyczepności (próba rozciągania i zarysowania), pomiary chropowatości, masy i grubości powłok. Wykonał również badania odporności powłok na cykliczne utlenianie.

Uważam, że przeprowadzone przez Doktoranta badania dostarczyły spójnych informacji, które pozwoliły na realizację celu pracy i rzetelne zweryfikowanie postawionej tezy. Chciałbym podkreślić duże znaczenie zarówno poznawcze jak i przede wszystkim praktyczne uzyskanych wyników badań.

W podsumowaniu stwierdzam, że cel i zakres opiniowanej pracy w pełni spełniają wymagania stawiane badaniom będącym podstawą rozpraw doktorskich.

Ocena rozprawy doktorskiej

Autor dysertacji bardzo dobrze zidentyfikował problem badawczy, poprawnie postawił tezę i sformułował cele badawcze oraz dobrał techniki badawcze adekwatnie do zaplanowanych zadań. Z lektury doktoratu można wywnioskować, że Doktorant wykonał eksperymenty samodzielnie, a uzyskane wyniki badań poddał szczegółowej analizie konfrontując je z aktualnym stanem wiedzy. Dowodzi to, że mgr inż. Grzegorz Maciaszek posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Doktorant podjął się realizacji ambitnego zadania aplikacyjnego mającego na celu ocenę wpływu parametrów procesu EB-PVD oraz stanu powierzchni międzywarstwy na jakość i właściwości użytkowe powłokowych barier cieplnych. Realizując to zadanie wykazał, że posiada On niezbędną wiedzę w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa, która skutecznie pozwoliła Mu na realizację planu badawczego.

Istotnym, z punktu widzenia praktycznego, jest przeprowadzenie przez Doktoranta analizy wpływu chropowatości powierzchni międzywarstwy, parametrów technologicznych procesu EB-PVD, tj. prądu emisji wiązki elektronów oraz ciśnienia w komorze roboczej na proces wzrostu powłoki ceramicznej oraz jej mikrostrukturę.

Wartościowym wynikiem badań w kontekście aplikacyjnym jest wykazanie przez Autora rozprawy, że stan powierzchni międzywarstwy (jej obróbka mechaniczna) znacząco wpływa na chropowatość, morfologię oraz jakość osadzonej powłoki ceramicznej. Jej polerowanie skutkowało zmniejszeniem chropowatości powierzchni powłoki oraz ukształtowaniem uporządkowanej, jednorodnej struktury kolumnowej (wzrost regularności i prostopadłości ziaren kolumnowych względem podłoża), co przyczynia się do poprawy odporności na degradację cieplną i właściwości mechanicznych.

Uważam, że bardzo cenne z punktu widzenia optymalizacji technologii osadzania powłok TBS jest wykazanie przez Doktoranta, że prąd emisji wiązki elektronów wpływa na grubość oraz masę powłoki ceramicznej poprzez zwiększenie szybkości odparowywania materiału oraz temperatury podłoża. Wpływa on również na rozmiar kolumn krystalicznych w powłoce ceramicznej, determinowany przez warunki cieplne panujące na powierzchni próbki podczas osadzania.

Doktorant wykazał, że wpływ ciśnienia w komorze roboczej EB-PVD również okazał się kluczowy dla jakości osadzanych powłok. Zastosowanie zbyt niskiego ciśnienia powodowało powstawanie powłok charakteryzujących się mikrostrukturą o nieregularnych ziarnach z występującymi niepożądanymi defektami obniżającymi ich jakości. Zaś podwyższenie ciśnienia nie powodowało poprawy grubości czy mikrostruktury powłoki. Doktorant wykazał, że istnieje dolna granica ciśnienia, poniżej której następuje istotna degradacja mikrostruktury powłoki TBC.

Bardzo wartościowym wątkiem dysertacji jest analiza przyczepności powłok ceramicznych. Doktorant zaobserwował, że niższa chropowatość powierzchni międzywarstwy, wyrażona niższym parametrem R_a , ma wpływ na wyższy poziom adhezji. We wszystkich przypadkach zniszczenie następowało wewnątrz spoiny klejowej (kohezja), a nie na granicy powłoka-międzywarstwa, co wskazuje, że rzeczywista adhezja warstw ceramicznych do podłoża przekraczała wytrzymałość zastosowanego kleju. Oznacza to, że powłoki EB-PVD wykazują bardzo wysoką adhezję, która przekracza możliwości pełnej weryfikacji przy zastosowaniu klejów o ograniczonej wytrzymałości.

Na podstawie przeprowadzonych badań odporności cieplnej w warunkach cyklicznego utleniania Doktorant dowiódł, że po 300 godzinach oddziaływania obciążeń termicznych przyczepność warstwy ceramicznej pozostawała na poziomie co najmniej 60 MPa. Wartość ta znacznie przewyższa dane literaturowe, co potwierdza wysoką trwałość powłok ceramicznych wytworzonych metodą EB-PVD.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że zaplanowany przez Doktoranta program badawczy został w pełni zrealizowany. Autor dysertacji dogłębnie zweryfikował hipotezę badawczą oraz osiągnął cel pracy.

Moim zdaniem rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Maciaszka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego o charakterze aplikacyjnym, bardzo dobrze osadzonego w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań wnoszą nową wiedzę w obszarze projektowania i optymalizacji procesu osadzania z fazy gazowej z odparowaniem za pomocą wiązki elektronów EB-PVD powłokowej bariery cieplnej TBC osadzonej na podłożu z nadstopu niklu.

Uwagi

W rozdziale 5.4.1 „Wpływ parametrów procesu EB-PVD na przyczepność powłoki ceramicznej” Doktorant stwierdza, że „....badania z wykorzystaniem konwencjonalnej próby statycznej rozciągania ASTM-C633 i spoiw epoksydowych o ograniczonej wytrzymałości na rozciąganie pozwalają jedynie na określenie minimalnego pułapu adhezji, który w tym przypadku jest znacząco wyższy od większości wartości raportowanych w literaturze dla powłok TBC uzyskiwanych innymi metodami (np. w procesie natryskiwania cieplnego).”

Po czym proponuje „aby ustalić faktyczny, graniczny poziom przyczepności powłok EB-PVD, wskazane jest rozważenie zastosowania klejów o wyższej wytrzymałości (należy wskazać, że stosowany w badaniach klej termoutwardzalny zapewniał najwyższe dostępne na rynku wartości wytrzymałości złącza klejonego) bądź alternatywnych metod testowania (np. testu ścinania, indentacji lub analizy numerycznej).”

A propos sugerowanych „alternatywnych metod testowania” - dlaczego Doktorant nie pokusił się o wykonanie jednej z nich np. indentacji? Cennym uzupełnieniem badań byłoby również przeprowadzanie analizy numerycznej.

Wyniki badań uzyskane przez Doktoranta podczas analizy odporności powłok TBC na cykliczne utlenianie (rozdział 5.5) pozwalają stwierdzić, że „stabilizacja masy po 100–160 h oraz późniejsza delaminacja wskazują na istotną rolę warstwy TGO w trwałości powłok ceramicznych oraz na potrzebę dalszych badań w celu zwiększenia ich odporności na długotrwałe cykle cieplne.”

Jakie eksperymenty sugeruje Doktorant aby zrealizować „potrzebę dalszych badań w celu zwiększenia ich odporności na długotrwałe cykle cieplne”?

W rozdziale 6 „Podsumowanie” Autor dysertacji sformułował kilkanaście „wniosków o charakterze użytkowym”. Czy w oparciu o szczegółowe dane zawarte w tych konkluzjach Doktorant mógłby sformułować konkretne wytyczne technologiczne procesu fizycznego osadzania powłokowej bariery cieplnej TBC osadzonej na podłożu z nadstopu niklu metodą EB-PVD?

Czy Doktorant mógłby wskazać kierunki ewentualnych dalszych badań nad optymalizacją procesu nanoszenia ceramicznych powłok TBC na podłożu z nadstopu niklu pod kątem polepszenia ich właściwości eksploatacyjnych? Czy ciężar tych badań powinien być skupiony na modyfikacji składu chemicznego (fazowego) i mikrostruktury powłok czy też na sposobie ich wytwarzania?

3. Wniosek końcowy

Bardzo dobrze oceniam pracę doktorską mgr inż. Grzegorza Maciaszka. Autor pracy wybrał bardzo interesujący problem badawczy, umiejętnie sformułował tezę, cel i zakres pracy oraz wnikliwie przeprowadził analizę otrzymanych wyników badań pod kątem opisu wpływu parametrów procesu fizycznego osadzania z fazy gazowej z odparowaniem za pomocą wiązki elektronów EB-PVD na właściwości użytkowe powłokowej bariery cieplnej TBC osadzonej na podłożu z nadstopu niklu.

Uzyskane przez Autora dysertacji wyniki badań pozwoliły na weryfikację postawionej tezy. Dowiódł, że optymalizacja warunków procesu EB-PVD oraz odpowiednie przygotowanie podłoża poprzez obróbkę mechaniczną wpływają korzystnie na mikrostrukturę wytwarzanych powłok, a tym samym na podwyższenie ich właściwości użytkowych.

Szczegółowa analiza rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Maciaszka pozwala stwierdzić, że:

- Zrealizowane przez Doktoranta badania, które pozwoliły na ocenę wpływu parametrów procesu EB-PVD oraz stanu powierzchni międzywarstwy na jakość i właściwości użytkowe powłokowych barier cieplnych, dowodzą, że posiadał On umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.
- Umiejętność krytycznej analizy otrzymanych przez Doktoranta wyników badań pod kątem ich wykorzystania w praktyce składa się na dużą wartość badawczą recenzowanej rozprawy. Dowodzi to, że Autor rozprawy posiada wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.
- Doktorant podjął się rozwiązania oryginalnego problemu badawczego, a uzyskane wyniki przyczyniły się do poszerzenia wiedzy w zakresie inżynierii powierzchni. Przedstawione w rozprawie doktorskiej badania dowodzą, że możliwe jest ciągłe optymalizowanie procesów technologicznych w oparciu o szczegółową analizę parametrów materiałowych i produkcyjnych.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora mgr inż. Grzegorzowi Maciaszkowi w dziedzinie nauk Inżynierijno-Technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Chciałbym podkreślić, że uzyskane w niniejszej rozprawie wyniki badań stanowią oryginalny wkład do rozwoju wiedzy w obszarze technologii osadzania powłok TBC na podłoże z nadstopu niklu. Uważam, że Doktorant wykazał nieprzeciętną zdolność do zidentyfikowania i skutecznej realizacji bardzo ambitnego celu badawczego o dużym potencjale wdrożeniowym otrzymanych wyników badań.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Rzeszowskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Grzegorza Maciaszka pt. „Analiza wpływu parametrów procesu fizycznego osadzania z fazy gazowej z odparowaniem za pomocą wiązki elektronów EB-PVD na właściwości użytkowe powłokowej bariery cieplnej TBC osadzonej na podłożu z nadstopu niklu”.


(podpis recenzenta)