



Dr hab. inż. Łukasz Major prof. PAN

Kraków 31.08.2017

Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej

im. Aleksandra Krupkowskiego

Polskiej Akademii Nauk

ul. Reymonta 25

30-059 Kraków

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Chrzanowskiej- Giżyńskiej
pt.: „Cienkie warstwy z borków wolframu osadzone impulsem laserowym
i metodą rozpylania magnetronego – wpływ parametrów procesu
na osadzone warstwy”,

zrealizowanej pod kierunkiem
promotora: prof. dr hab. Zygmunta Szymańskiego
oraz promotora pomocniczego: dr hab. Jacka Hoffmana

Recenzja rozprawy doktorskiej opracowana została na podstawie uchwały Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN z dnia 29 czerwca 2017 r.

1. Wstęp oraz charakterystyka ogólna pracy

Zużycie oraz korozja są wszechobecnymi problemami, które oddziałują na każdy rodzaj powierzchni. Powłoki tribologiczne, czyli odporne na zużycie mechaniczne, wykorzystywane są głównie w celu zwiększenia odporności. Inżynieria powierzchni stała się nieodzownym narzędziem w celu poprawy właściwości powierzchni ciał stałych. Prawie wszystkie typy materiałów, w tym metale, ceramika, polimery i kompozyty mogą być pokrywane cienkimi powłokami tworzącymi struktury powierzchniowe podobne do materiału

podłoża lub od niego odmienne. Funkcjonalna inżynieria powierzchni pozwala na przedłużanie czasu eksploatacji narzędzi, części silników czy implantów medycznych. Właściwości elektryczne, optyczne, mechaniczne i tribologiczne, jak również struktura i mikrostruktura cienkich powłok mogą zmieniać się w szerokim zakresie. Jest to uzależnione od stosowanego procesu osadzania. Powszechnie stosuje się powłoki z azotków metali grup przejściowych wytwarzanych metodą fizycznego osadzania par (technika PVD), z uwagi na ich pożądane właściwości, w tym dużą twardość i obojętność chemiczną. Jednym z najwcześniej stosowanych typów twardych powłok tribologicznych oraz zwiększających odporność korozyjną był azotek tytanu (TiN).

Innego typu powłokami odpornymi na zużycie mechaniczne oraz korozję są powłoki z węglików metali grup przejściowych, takie jak np. węgiel tytanu (TiC) lub węgiel wolframu oraz powłoki diamentopodobne (DLC lub a-C).

Nowym rozwiązaniem jest obecnie tendencja do wytwarzania powłok z borków metali grup przejściowych, z uwagi na możliwość uzyskania znacznie większej twardości w porównaniu do powłok z węglików tych samych metali oraz znacznie niższy współczynnik tarcia i odporność na zużycie mechaniczne. Przykładowo borek tytanu (TiB_2) charakteryzuje się twardością rzędu 35 GPa, natomiast węgiel tytanu posiada twardość 12- 28 GPa. Współczynnik tarcia TiB_2 mieści się w zakresie 0.02- 0.15, podczas gdy dla TiC w zakresie 0.15- 0.53.

Recenzowana rozprawa doktorska miała na celu przeprowadzenie badań powłok z borków wolframu osadzonych impulsową wiązką laserową o długości fali 355 i 1064 nm lub magnetronem z zasilaczem RF.

Borki wolframu stanowią grupę atrakcyjnych aplikacyjnie materiałów z uwagi na właściwości takie jak: obojętność chemiczna, wysoka twardość, odporność na zużycie mechaniczne oraz dobre przewodnictwo elektryczne. Mogą one znaleźć zastosowanie np. na narzędzia skrawające lub na odporne na zużycie powłoki. Jedynie tetragonalny borek wolframu może mieć podobne lub lepsze właściwości od jego odpowiednika węglkowego (WC). Niestety, bardzo trudno jest przygotować czysty fazowo oraz dobrze spieczony materiał WB. Niewiele jest danych literaturowych opisujących właściwości tego materiału.

Pierwsza część recenzowanej pracy poświęcona jest powłokom wytwarzanym metodą laserowej ablacji (PLD). Przeprowadzono badania wpływu długości fali promieniowania laserowego, gęstości energii (fluencji) i temperatury podłoża. Powłoki były chropowate i miały na powierzchni liczne krople, których wielkość i liczba były mniejsze przy osadzaniu laserem o dłuższej fali i niższej fluencji.

W metodzie PLD, impulsowa wiązka laserowa skupiana jest na materiale tarczy w celu odparowania jego warstw powierzchniowych na drodze ablacji. Proces odbywa się w próżni lub w atmosferze gazów przy niskim ich ciśnieniu. Odparowany materiał zawierający atomy, jony oraz klastery nakładany jest na podłoże. Wyjątkową zaletą tej metody jest możliwość otrzymania cienkich powłok o bardzo wysokiej czystości chemicznej oraz bardzo dobrej jakości przylegania do różnego rodzaju materiału podłoża w temperaturze otoczenia (czyli podłoże nie jest grzane podczas procesu nakładania). Zastosowanie gazów reakcyjnych podczas procesu nakładania umożliwia wytwarzanie powłok o różnorodnym składzie chemicznym.

Jedną z podstawowych wad metody PLD jest fakt, że oprócz ablacji odparowywanego materiału tarczy, z jego powierzchni wyrzucane są cząstki w postaci stałej lub ciekłej, co prowadzi do niewłaściwej jakości powierzchni wytwarzanych cienkich powłok w postaci ich słabej jakości przylegania, dużej chropowatości czy kropeł na powierzchni powłoki.

W recenzowanej pracy przeprowadzono bardzo istotną analizę czynników wpływających na ilość oraz rozmiar kropeł.

Aby zminimalizować problem tworzenia się kropeł na powierzchni wytwarzanych powłok metodą PLD, w literaturze przedstawionych jest wiele rozwiązań. Jednym z nich jest zastosowanie tzw. techniki „shaded off-axis”, gdzie materiał tarczy oraz podłoża zorientowane są prostopadle w stosunku do siebie oraz gdzie stosuje się metaliczny ekran w celu zabezpieczenia powierzchni pokrywanego materiału przed bezpośrednim strumieniem niepożądanych stałych lub ciekłych cząstek materiału tarczy. Ten niepożądany proces czasem jest nie do uniknięcia z uwagi na rodzaj materiału tarczy. Analiza czynników w formie badań podstawowych, wpływających na ilość oraz rozmiar kropeł jest zatem bardzo istotna.

Druga część recenzowanej pracy dotyczyła powłok osadzanych techniką magnetronową, gdzie określono wpływ mocy rozpylania, ciśnienia roboczego i temperatury podłoża na właściwości powłok. Technika ta została w pracy

zaproponowana jako alternatywna z uwagi na duże trudności w osadzaniu jednorodnych powłok z borków wolframu metodą PLD.

Proces osadzania magnetronowego polega na wytworzeniu plazmy, gdzie dodatnio naładowane jony gazu roboczego przyspieszane są przez pole elektryczne przyłożone do ujemnie naładowanej elektrody (materiał tarczy). Pozytywnie naładowane jony przyspieszane są przez różnicę potencjałów w zakresie od kilkuset do kilku tysięcy eV, a następnie uderzają w elektrodę ujemną z odpowiednią energią aby wybić atomy z jej powierzchni.

W recenzowanej pracy powłoki osadzone tą techniką miały bardzo gładką powierzchnię, a szybkość ich osadzania była co najmniej dwukrotnie większa niż powłok osadzanych techniką PLD.

Problematykę recenzowanej pracy uważam za aktualną i uzasadnioną oraz dobrze ukierunkowaną, zarówno w aspekcie poznawczym, jak i utylitarnym. Praca wymagała przeprowadzania optymalizacji procesów nakładania zarówno metodą PLD, jak i magnetronową nowego typu twardych powłok tribologicznych na bazie borku wolframu. W ramach realizacji pracy przeprowadzono szeroką charakterystykę materiałów, pod kątem analizy mikrostrukturalnej, składu chemicznego oraz fazowego, jak również właściwości mechanicznych. Do tego celu wykorzystano technikę dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), skaningową oraz transmisyjną mikroskopię elektronową (odpowiednio SEM oraz TEM), technikę spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego i spektroskopii fotoelektronów w zakresie promieniowania X. Właściwości mechaniczne wytworzonych powłok określone zostały na podstawie przeprowadzenia pomiaru nano- twardości oraz modułu Younga.

Rozprawa doktorska złożona jest z pięciu części. Część pierwsza (str. 1- 5) to wprowadzenie, gdzie scharakteryzowano materiał w aspekcie twardych powłok tribologicznych oraz techniki ich wytwarzania jakie wykorzystano w pracy. Część pierwsza kończy się tezą. Długa część (str. 6- 23) dotyczy przedstawienia szczegółowych danych literaturowych opisujących materiał tarczy zastosowany na twarde powłoki tribologiczne na bazie borku wolframu. Przedstawiono dane dotyczące właściwości mechanicznych, a w szczególności twardości i zestawiono je z danymi dotyczącymi materiałów supertwardych. Część ta dotyczy również analizy danych literaturowych dotyczących struktury, składu chemicznego oraz fazowego borków wolframu. Trzecia i czwarta część związane są z teoretycznym opisem wykorzystanych w pracy technik nakładania cienkich powłok oraz z przedstawieniem wyników eksperymentalnych

dotyczących charakterystyki mechanicznej oraz mikrostrukturalnej uzyskanych powłok. W części trzeciej pracy (str. 24- 71) przedstawiono opis teoretyczny metody laserowej ablacji oraz wyniki eksperymentalne dotyczące analizy materiału tarcz, z których wytwarzano powłoki i analizy właściwości mechanicznych oraz strukturalnych samych powłok. Część czwarta (str. 72- 98) pracy poświęcona została powłokom borku wolframu wytwarzanym techniką magnetronową. Podobnie jak w części dotyczącej metody PLD, przedstawiono opis teoretyczny techniki magnetronowej oraz wyniki eksperymentalne dotyczące analizy materiału tarcz, z których wytwarzano powłoki i analizy właściwości mechanicznych oraz strukturalnych samych powłok. Podsumowanie wyników i wnioski przedstawiono w części piątej pracy (str. 99- 101). Spis literatury obejmuje 133 pozycje, w większości są to czasopisma zagraniczne z tzw. Listy Filadelfijskiej, gdzie 5 pozycji to autocytowania własnych prac Doktorantki. Przedstawiony spis literaturowy z jakiego Doktorantka korzystała podczas swojej pracy świadczy o dobrym jej przygotowaniu merytorycznym do podjęcia problematyki badawczej.

Pracę uzupełnia aneks zawierający wykaz oznaczeń i skrótów oraz dodatek dotyczący opisu teoretycznego pomiaru twardości cienkich warstw. Pomiar twardości nie był najważniejszym badaniem przeprowadzonym w pracy, zatem można byłoby go pominąć. Badania do pracy prowadzone były w ramach projektu PRELUDIUM finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki NCN, o numerze: 2015/19/N/ST8/03928.

2. Ocena części literaturowej rozprawy

Opis danych literaturowych pracy nie jest wyraźnie oddzielony od opisu danych doświadczalnych. Ten pierwszy można podzielić na cztery części. Pierwsza część (rozdział 1) to wprowadzenie, gdzie przedstawiono motyw podjęcia się tematyki związanej z wytworzeniem twardych powłok na bazie borku wolframu technikami PVD oraz scharakteryzowaniem ich struktury i możliwych defektów. Część ta zakończona jest sformułowaniem tezy, że co najmniej jedna z tych metod pozwoli na uzyskanie stabilnych, cienkich powłok o twardości przekraczającej 40 GPa. Uważam, że teza powinna być przedstawiona w inny sposób. W tezie raczej zamieszcza się informację, że coś występuje lub nie, ze stu procentową pewnością. Następnie w ramach badań doświadczalnych tezę się udowadnia lub nie. Druga część opisu literaturowego dotyczy charakterystyki właściwości materiału z jakiego wykonane zostały tarcze

do nakładania cienkich powłok oraz samych cienkich powłok z borku wolframu. Obecnie jest tendencja do wytwarzania powłok z borków metali grup przejściowych z uwagi na możliwość uzyskania znacznie większej twardości w porównaniu do powłok z węglików tych samych metali oraz znacznie niższy współczynnik tarcia i odporność na zużycie mechaniczne. Borki wolframu stanowią grupę atrakcyjnych aplikacyjnie materiałów z uwagi na właściwości jakimi się charakteryzują czyli: obojętność chemiczną, wysoka twardość, odporność na zużycie mechaniczne oraz dobre przewodnictwo elektryczne. Niewiele jest danych literaturowych dotyczących tego typu powłok. Zatem podjęta w pracy tematyka związana z wytworzeniem twardych, tribologicznych powłok typu WB jest nowoczesna, dająca istotny wkład w rozwój nowoczesnej inżynierii powierzchni. W podrozdziale 2.1 przeprowadzono porównanie właściwości borku wolframu z materiałami należącymi do grupy super-twardych. Na stronie 11 zamieszczono informację, że szczególnie interesującą cechą borków wolframu jest twardość, która mieści się w zakresie od około 20 GPa do ponad 40 GPa, natomiast na stronie 13 (rozdział 2.2 poświęcony strukturom chemicznym i fazowym), opisując fazę W_2B wspomniano, że jej twardość wynosi 12.9 do 23.7 GPa. Jest to pewnego rodzaju nieścisłość danych teoretycznych dotyczących tego materiału. Trzecia część opisu literaturowego dotyczy opisu metody laserowej ablacji (PLD), czyli jednej z technik nakładania powłok, jaka została wykorzystana w pracy. Jest to technika nowoczesna, pozwalająca na nakładanie precyzyjnych powłok na podłoża w temperaturze otoczenia. Jednak wymaga ona od operatora dużego doświadczenia oraz wiedzy w doborze właściwych parametrów nakładania. Teoretyczny opis metody PLD zamieszczony został w podrozdziale 3.1. Szeroko opisane zostały zalety tej metody nakładania, jednak jak każda technika posiada również swoje ograniczenia, o których warto by wspomnieć. Jedną z wymienionych zalet jest możliwość przenoszenia składu stechiometrycznego materiału tarczy na powłokę (str. 30), jednak stwierdzono, że stechiometria osadzonej powłoki w przypadku tarczy wieloskładnikowej często nie zostaje zachowana. Zatem powstaje pytanie, czy powinno się wspominać o tej zaletce skoro nie do końca jest ona prawdziwa? Inną z zalet metody PLD jaką Doktorantka wymieniła na str. 30 jest fakt, że w wyniku absorpcji dużej energii (fluencji $1J/cm^2 - 10^8 W/cm^2$) wszystkie składniki tarczy, niezależnie od temperatury parowania zostają odparowane jednocześnie, natomiast na stronie 31 znajduje się informacja, że selektywne odparowanie składników tarczy wpływa na stechiometrię powłoki. Zatem powstaje pytanie czy metoda PLD cechuje się jednoczesnym odparowaniem wszystkich składników tarczy ?

Czwarta część opisu teoretycznego dotyczy techniki magnetronowej. Do tej części nie ma uwag krytycznych.

Podsumowując, część literaturową rozprawy oceniam pozytywnie. Stanowi ona wystarczającą podstawę teoretyczną do opracowania podjętego tematu rozprawy.

3. Ocena części merytorycznej rozprawy

Część merytoryczna rozprawy dotyczy dwóch zagadnień. Pierwsze związane jest z charakterystyką powłok wytwarzanych metodą laserowej ablacji, drugie zagadnienie dotyczy powłok wytwarzanych metodą magnetronową. Technika laserowej ablacji jest metodą wymagającą dużego doświadczenia od operatora w doborze parametrów pracy lasera w procesie wytwarzania powłok.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że wszystkie powłoki jakie zostały scharakteryzowane w pracy pod kątem ich struktury i właściwości, samodzielnie zostały wytworzone przez Doktorantkę. Badane w pracy nowego rodzaju powłoki na bazie WB są trudne do nakładania. Związane jest to również z problemem przygotowania dobrej jakości tarczy. Charakteryzując właściwości powłok wytworzonych metodą PLD Doktorantka podjęła się trudnego zagadnienia dotyczącego analizy czynników wpływających na ilość oraz rozmiar kropelek na powierzchniach wytwarzanych cienkich powłok metodą PLD.

Wyniki przedstawione zostały w sposób przejrzysty oraz logiczny. Generalnie, opis uzyskanych wyników oraz ich dyskusję oceniam pozytywnie, jednakże poniżej pozwolę sobie przedstawić drobne uwagi merytoryczne oraz kwestie, które w mojej ocenie wymagałyby nieco szerszego wyjaśnienia:

1). Uwaga: na stronie 48, w opisie powłoki WB_{2.5} wytworzonej metodą PLD stwierdzono, że powłoka uległa częściowej delaminacji, co mogło wskazywać na naprężenia własne występujące w powłoce.

Komentarz: Naprężenia własne zawsze występują w powłoce oraz w materiale litym. Istotna jest ich wartość oraz charakter (ściskające czy rozciągające)

2). Uwaga: Na Rys. 28 przedstawiono warstwę implantowanych jonów Ga powstałą podczas preparatyki FIB.

Komentarz: Taka warstwa się nie tworzy. Ga implantowany jest w całą objętość cienkiej folii. Jego ilość uzależniona jest od precyzji prowadzenia samej preparatyki. To co zaobserwowano na obrazie i opisano jako warstwa Ga, może być delikatnie wbitymi atomami W w powierzchnię powłoki.

3). Pytanie: na stronie 54 opisano, że tarcze do nakładania powłok, wykonane techniką SPS były porowate oraz niejednorodne. Czy porowatość tarcz, a tym samym słabe związanie ze sobą cząstek materiału tarczy nie jest główną przyczyną tworzenia się kropeł ?

4). Pytanie: na stronie 65 opisano, że duże poszerzenie linii dyfrakcyjnych w przypadku powłoki WB_{4.5} wskazuje na nanokrystaliczną strukturę i wysoki stopień zdefektowania sieci krystalicznej. O jakiego typu defektach jest tutaj mowa i w jaki sposób wpływają one na właściwości np. mechaniczne powłoki ?

5). Uwaga: na stronie 68 stwierdzono, że krople mogą mieć strukturę amorficzną, ponieważ gdy następuje przetopienie mikrocząstki, traci ona krystaliczną strukturę i staje się materiałem o nieuporządkowanej strukturze amorficznej.

Komentarz: Nie jest to warunek wystarczający do powstania struktury amorficznej. Taka przetopiona cząstka musi dotrzeć do „zimnego” podłoża i następuje tzw. zamrożenie struktury fazy ciekłej czyli struktury amorficznej. Jeżeli różnica temperatur cząstki stopionej i podłoża nie jest wystarczająca, nastąpi wtedy właściwy proces krystalizacji.

6). Pytanie: str. 69- wyniki testu nano-indentacji. Testy nano-indentacji powłok wykonanych metodą PLD przeprowadzono przy obciążeniu 5, 7, 10, 30 mN za pomocą węgelnika Vickersa. W przypadku powłok wykonanych techniką magnetronową stosowano tylko obciążenie 5mN i węgelnik Berkowich'a. Dlaczego nie zastosowano takich samych obciążeń dla powłok wykonanych metodą PLD oraz magnetronową oraz dlaczego

nie zastosowano tego samego rodzaju wgnębnika? Wgnębnik Berkovich'a jest właściwszy do badań twardości cienkich powłok z uwagi na jego geometrię, czyli duży kąt rozwarcia i możliwość pomiaru twardości ze znacznie lepszą dokładnością.

7). Pytanie: na stronie 70, Doktorantka wspomina o istnieniu naprężeń resztkowych w powłoce wytworzonej metodą PLD. Jak Doktorantka identyfikuje tego typu naprężenia ?

8). Uwaga: na stronie 82 opisując wyniki TEM dotyczące charakterystyki mikrostruktury powłok wytworzonych techniką magnetronową stwierdzono, że podczas preparatyki cienkich folii techniką FIB, powłoki pokryto cienką, ochronną warstwą węgla.

Komentarz: W przypadku preparatyki cienkich folii techniką FIB, węgiel nie jest materiałem ochronnym. Warstwą ochronną może być materiał z ciężkich pierwiastków, który w wyniku oddziaływania z wiązką jonową (Ga^+) usuwany będzie wolniej niż materiał właściwy. Zwykle stosuje się Pt lub W. Węgiel nakłada się przed nałożeniem Pt lub W, ponieważ jako pierwiastek lekki w jasnym polu obserwacji techniką TEM widoczny jest jako jasna warstwa i dodatkowo chroni przed wbijaniem się cząstek Pt i W w powierzchnię materiału. Dzięki temu topografia powierzchni badanego materiału jest lepiej wyeksponowana.

9). Pytanie: Rys. 52; Czy granica powłoka/ podłoże nie została przypadkiem niewłaściwie zaznaczona ? Si jako materiał znacznie lżejszy od materiału powłoki powinien być widoczny jako znacznie jaśniejszy. Na obrazie jest wpływ kontrastu dyfrakcyjnego oraz grubościowo- masowego. W moim przekonaniu granica jest znacznie niżej niż to zaznaczono na obrazie. Podłoże Si widoczne jest jako jasny obszar.

10). Uwaga: na stronie 83 stwierdzono, że zarejestrowane dyfraktogramy mają położenie i natężenie plamek dyfrakcyjnych takie same jak w przypadku związku α -WB.

Komentarz: Natężenie uzależnione jest od tego jak bardzo skupimy wiązkę regulując ją soczewką kondensorową oraz od grubości folii i zastosowanej przesłony. Jeżeli chodzi o tą samą pozycję plamek dyfrakcyjnych (raczej powinno się mówić o refleksach dyfrakcyjnych), to trudno tu wspominać ponieważ przesłona obejmowała kilka ziaren. Zastosowana średnica przesłony wynosiła 250 nm, a średnica ziaren 20- 40 nm, zatem dyfrakcja jest dyfrakcją pierścieniową a nie punktową.

Pracę kończy rozdział 5 obejmujący podsumowanie wyników badań oraz wnioski wynikające z ich analiz.

4. Ocena końcowa

Opiniowana rozprawa doktorska, jak również dorobek naukowy, świadczą o dobrym przygotowaniu teoretycznym oraz eksperymentatorskim Doktorantki.

Warto podkreślić, że Doktorantka opanowała różne techniki nakładania cienkich powłok i samodzielnie, dobierając różne parametry nakładania, przygotowała materiał do badań w postaci cienkich powłok typu WB. Dodatkowo nakładanie było bardzo utrudnione z uwagi na trudności w przygotowaniu dobrej jakości tarcz WB. Doktorantka wykazała się umiejętnością planowania badań oraz doboru i stosowania nowoczesnych metod badawczych oraz interpretacji wyników badań. Całość rozprawy napisana jest poprawnym językiem naukowym.

Uwagi, posiadające w większości charakter dyskusji naukowej, przedstawione zostały w częściach poświęconych ocenie części literaturowej i badawczej rozprawy. W pracy znalazły się również drobne niedociągnięcia edytorskie.

Podsumowując, recenzowaną rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Na podstawie analizy uzyskanych przez Doktorantkę wyników badań oraz wniosków z niej wypływających uważam, że cel pracy został osiągnięty, a teza wystarczająco udowodniona.

Wniosek końcowy

Na podstawie analizy rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Chrzanowskiej- Giżyńskiej pt. „Cienkie warstwy z borków wolframu osadzone impulsem laserowym i metodą rozpylania magnetronowego- wpływ parametrów procesu na osadzone warstwy” stwierdzam, że zawiera ona wartościowe wyniki poznawcze i stanowi oryginalny i twórczy wkład w dyscyplinę inżynieria materiałowa, a w szczególności inżynieria powierzchni.

W mojej opinii rozprawa doktorska Pani mgr inż. Justyny Chrzanowskiej- Giżyńskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dlatego też, w świetle wyżej przedstawionej, pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 r. (Dz. U. poz. 595 z późn. zm.) i wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN o dopuszczenie mgr inż. Justyny Chrzanowskiej- Giżyńskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz do publicznej dyskusji nad rozprawą.



Dr hab. inż. Łukasz Major