

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kuczma
Instytut Konstrukcji Budowlanych
Politechnika Poznańska
Email: mieczyslaw.kuczma@put.poznan.pl
Tel.: 662 140073

Poznań, 10.04.2017

**Recenzja jednotematycznego cyklu publikacji
„Modelowanie numeryczne procesów zachodzących podczas ablacji
nanosekundowym impulsem lasera”
i dorobku naukowego, dydaktycznego oraz współpracy międzynarodowej
dr. inż. Tomasza Mościckiego
w Jego postępowaniu habilitacyjnym**

1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję opracowałam na podstawie pisma Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, dr. hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, prof. IPPT PAN, informującego o powołaniu mnie przez Centralną Komisję do Spraw Stopni i Tytułów na recenzenta w postępowaniu habilitacyjnym dr. inż. Tomasza Mościckiego. Wraz z powołaniem na recenzenta otrzymałem w formie papierowej i elektronicznej dokumentację, o której mowa w art. 18a ust.1 Ustawy.

Opinię sporządziłem kierując się Ustawą z dnia 14.03.2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami, w brzmieniu ustalonym ustawą z dnia 18 marca 2011 r. (Dz. U. nr 84, poz. 455)), rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 01.09.2011 roku w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego (Dz. U. nr 196, poz. 1165), oraz rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 10.11.2015 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2015, poz. 1842).

2. Informacje ogólne o Habilitancie

Tomasz Mościcki jest absolwentem Politechniki Warszawskiej, gdzie studiował na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa, uzyskując w październiku 2001 r. stopień magistra inżyniera w dziedzinie mechanika, na kierunku Inżynieria Środowiska (w zakresie Ekologicznych problemów energetyki cieplnej).

Od stycznia 2002 r. jest zatrudniony w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN, najpierw na stanowisku asystenta a następnie, po obronie doktoratu w macierzystej



jednostce w lutym 2007r., kontynuuje tam zatrudnienie na stanowisku adiunkta (od kwietnia 2007r.). Tematem pracy doktorskiej Habilitanta było „Badanie właściwości fizycznych obłoku plazmowego powstającego przy spawaniu laserowym stali”. Promotorem pracy doktorskiej był prof. Zygmunt Szymański.

Za osiągnięcia naukowe, w szczególności za publikacje w najwyżej punktowanych czasopismach, Kandydat otrzymał dwa wyróżnienia Dyrektora IPPT PAN, jedno w kategorii młodych pracowników (2012r.) a drugie w kategorii pracowników >35 lat (2016r.).

3. Charakterystyka i ocena jednotematycznego cyklu publikacji

Jako osiągnięcie naukowe w postępowaniu habilitacyjnym Kandydat przedkłada do oceny cykl 7 publikacji powiązanych tematycznie, ujętych we wniosku wspólnym tytułem „Modelowanie numeryczne procesów zachodzących podczas ablacji nanosekundowym impulsem lasera”. Wszystkie prace zostały opublikowane w j. angielskim, w renomowanych czasopismach, głównie z dziedziny fizyki. Suma punktów MNiSW przypisanych publikacjom tego cyklu wynosi 180, natomiast suma współczynników wpływu IF = 9,364. Kandydat jest pierwszym autorem wszystkich publikacji, będąc jedynym autorem 2. publikacji, a jego udział w pozostałych 5. pracach jest rzędu 80–90% (65% w pracy [H6]). Załączone są oświadczenia współautorów, które określają zakres merytoryczny udziału poszczególnych współautorów danej pracy.

Cykl jednotematycznych publikacji obejmuje następujące prace:

- [H1] **Mościcki T.**, Hoffman J., Szymanski Z.: *Modelling of plasma formation during nanosecond laser ablation*, Archives of Mechanics **63** (2011), 99-116.
[IF: 0.75, 20 pkt., udział 90%]
- [H2] **Moscicki T.**, Hoffman J., Szymański Z.: *Laser ablated carbon plume: experiment and modelling*, Nukleonika. International Journal of Nuclear Research **57** (2012), 283-286.
[IF: 0.40, 15 pkt., udział 80%]
- [H3] **Moscicki T.**, Hoffman J., Szymański Z.: *The effect of laser wavelength on laser-induced carbon plasma*, Journal of Applied Physics **114** (2013), 083306.
[IF: 2.19, 35 pkt., udział 80%]
- [H4] **Moscicki T.**: *Expansion of laser-ablated two-component plume with disparate masses*, Physica Scripta **T161** (2014), 014024. [IF: 1.13, 25 pkt.]
- [H5] **Moscicki T.**: Hoffman J., Chrzanowska J.: *The absorption and radiation of a tungsten plasma plume during nanosecond laser ablation*, Physics of Plasmas **22** (2015), 103303. [IF: 2.14, 30 pkt., udział 80%]
- [H6] **Moscicki T.**, Radziejewska J., Hoffman J., Chrzanowska J., Levintant-Zayonts N., Garbiec D., Szymanski Z.: *WB₂ to WB₃ phase change during reactive spark plasma sintering and pulsed laser ablation/deposition processes*, Ceramics International **41** (2015), 8273-8281. [IF: 2.61, 40 pkt., udział 65%]
- [H7] **Moscicki T.**: *Differences in nanosecond laser ablation and deposition of tungsten, boron and WB₂/B composite due to optical properties*, International Journal of Optics 2016, 1-13 [IF: 0.30 (SJR), 15 pkt.].



Prace [H4] i [H7] są autorskimi pracami Habilitanta, a pozostałe prace [H1 – H3] oraz [H5, H6] są pracami współautorskimi. W autoreferacie Habilitant określił swój udział w przygotowaniu prac jako dominujący, sięgający aż 80–90% (w załączonych oświadczeniach określono zakres rzeczowy udziału współautorów bez jego kwantyfikacji procentowej).

Oceniając na wstępie ogólnie tematykę badawczą i zakres badań podjętych przez Kandydata stwierdzam, że tematyka jest aktualna a badania dotyczą nowatorskiego technologicznie procesu nanoszenia cienkich powłok (o grubości od kilku nanometrów do kilku mikrometrów) przy wykorzystaniu zjawiska ablacji, tj. powierzchniowego usuwania materiału za pomocą impulsu promieniowania laserowego o dużym natężeniu. Metoda ta jest szczególnie przydatna w przypadku osadzania warstw z supertwardych materiałów. Numerycznie symulowano zjawiska zachodzące w wyniku oddziaływania wiązki nanosekundowego lasera Nd:YAG z tarczami wykonanymi z aluminium, boru, grafitu, renu, wolframu, oraz kompozytu WB_2/B . Atutem badań i wniosku przedłożonego przez Kandydata jest ich zakres, który obejmuje modelowanie teoretyczne i symulacje komputerowe, jak również własne uzupełniające eksperymenty laboratoryjne (wykonane w zespole autorskim).

Podstawowy model teoretyczny zjawiska ablacji laserowej oraz formowania się obłoku plazmy i jego ekspansji został sformułowany w pracy [H1]. Model dotyczy zjawiska ablacji termicznej i uwzględnia efekt pochłaniania energii z promieniowania laserowego przez gęsty obłok plazmy, który powstaje w wyniku uprzedniego działania promieniowania laserowego na powierzchnię materiału poddanego ablacji. Kandydat modeluje grzanie tarczy z materiału do ablacji oraz formowanie się obłoku plazmowego i jego ekspansji, uwzględniając różnorodne mechanizmy pochłaniania w plazmie. Skład obłoku plazmowego (będącego mieszaniną elektronów, jonów, i cząstek obojętnych) zależy od ciśnienia gazu i temperatury. W zaproponowanym modelu oblicza się go przy założeniu równowagi termodynamicznej, spełniając równanie stanu, prawo Daltona, równanie jonizacyjne Saha i warunek obojętności elektrycznej. W podanym przykładzie obliczeniowym rozpatrzono oddziaływanie wiązki laserowej z tarczą aluminiową. W testach laboratoryjnych zastosowano laser Nd:YAG o długości fali 1064 nm i impulsów 10 ns. Uzyskano dobrą zgodność wyników obliczeń numerycznych według modelu teoretycznego i rezultatów eksperymentów laboratoryjnych.

Praca [H2] zawiera wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych ablacji grafitu. Użyty model rozpatrywanych procesów podczas ablacji, tj. grzania powierzchni materiału do ablacji oraz formowanie się obłoku plazmowego i jego ekspansji, ma analogiczną strukturę jak w pracy [H1], z niewielką modyfikacją równania nagrzewania powierzchni materiału do ablacji i warunku brzegowego na powierzchni materiału poddanej działaniu wiązki lasera. Uzyskano dobrą zgodność rozkładów temperatury plazmy i gęstości elektronów obliczonych numerycznych z tymi pomierzonymi metodami spektroskopii emisyjnej.

Rozpatrywany w pracy [H3] model teoretyczny zdefiniowany jest także układem równań zachowania masy, pędu i energii oraz równaniem transportu jak w pracach poprzednich. Badano tutaj wpływ długości fali lasera na właściwości obłoku plazmowego

wzbudzonego z powierzchni wykonanej z węgla. Obliczenia wykonano dla dwóch długości falowych lasera Nd:YAG: 355 nm i 1064 nm, zakładając 10 ns impulsy laserowe o rozkładzie gaussowskim i natężeniu $1,5 \text{ GW/cm}^2$. Otrzymane wyniki — pokazujące, że temperatura plazmy jest większa w przypadku dłuższych fal laserowych (tutaj 1064 nm), natomiast gęstość elektronów jest większa w przypadku krótszych fal laserowych (tutaj 355 nm) — są zgodne z obserwacjami laboratoryjnymi.

Praca [H4] przedstawia wyniki teoretycznego badania rozprzestrzeniania się obłoku plazmowego w przypadku ablacji stopu renu i boru ReB_2 oraz stopu chromu i boru WB_4 . Zastosowano teoretyczny model użyty poprzednio oraz laser Nd:YAG: o długości fali 355 nm i 10 ns okresie trwania impulsów. Otrzymane wyniki obliczeń uwidaczniają, zgodnie z oczekiwaniem wobec różniących się znacznie mas cząsteczkowych stopów, że prędkości wolframowej plazmy są mniejsze (44/17 razy) niż borowej plazmy, natomiast odwrotnie temperatura jest mniejsza plazmy powstałej z stopu boru niż ze stopu wolframu.

W pracy [5] omówiono wyniki modelowania teoretycznego absorpcji i emisji obłoku plazmy wygenerowanej z wolframu poddanego 10 ns napromienianiu laserem Nd:YAG Quantel YG981 o gęstości energii 10 J/cm^2 i długości fal 355 nm i 1064 nm, przy różnym ciśnieniu 0,1, 1, 10, 100 MPa. W obliczeniach wykorzystano model teoretyczny omówiony w poprzednich pracach Habilitanta, dostosowany tu do parametrów technicznych użytego lasera. Udział ułamkowy fazy f_l jest przyjęty w postaci zależności liniowej między 0 i 1, zależnie od temperatury T między T_{sol} i T_{liq} . Komputerowe symulacje pokazały, że w przypadku wolframu nie tylko promieniowanie fotorekombinacyjne stanowi największy składnik promieniowania obłoku plazmowego, ale także udział promieniowania linii spektralnych jest znaczący (odpowiednio rzędu 45% i 25% dla fal długości 1064 nm i 355 nm), natomiast udział promieniowania hamowania (bremsstrahlung) jest istotny, rzędu 10% przy długości fali 1064 nm.

Praca [6] przedstawia wyniki badań laboratoryjnych spiekania iskrą plazmową (SPS) ceramiki WB_2/WB_3 i osadzania laserem impulsowym (PLD) cienkich powłok o grubości 1 μm , charakteryzujących się supertwardością i dużą sztywnością. Badania dyfraktometrem rentgenowskim (XRD) pokazały, że już w czasie ablacji zachodzi (86,9%) przemiana fazowa z WB_2 na WB_3 , a pozostała część przemiany ma miejsce w czasie osadzania i chłodzenia.

Praca [7] jest kontynuacją [6], w której Habilitant bada i wyjaśnia różnice w ablacji tarcz wykonanych z kompozytu WB_2/B , wolframu i boru przy zastosowaniu tej samej gęstości energii (10 J/cm^2). Jako wyjaśnienie proponuje wprowadzenie nowego mechanizmu usuwania materiału podczas ablacji poprzez „detonację w fazie ciekłej”, który ma znaczenie w przypadku materiałów kompozytowych o znacząco różnych właściwościach optycznych i termodynamicznych składników.

Ocena jednotematycznego cyklu publikacji

Przedłożony do oceny cykl siedmiu publikacji jest spójny tematycznie i obejmuje modelowanie teoretyczne, badania numeryczne i walidacyjne testy laboratoryjne. Z uwagi na podstawową i dominującą rolę symulacji numerycznych w badaniach własnych



Habilitanta, można uznać, że przyjęty temat cyklu „Modelowanie numeryczne procesów zachodzących podczas ablacji nanosekundowym impulsem lasera” jest trafnie dobrany.

Publikacje cyklu ukazały się w wysokopunktowanych czasopiśmie z współczynnikiem wpływu (IF); sumaryczny IF dla wszystkich prac [H1] – [H7] równa się 9,364 (=9,064 + 0,3(SJR)) a odpowiadająca im sumaryczna liczba punktów MNiSW wynosi 180, natomiast liczba cytowań wg WoS równa się 18.

Na podkreślenie zasługuje teoretyczno-eksperymentalny, dopełniający charakter badań prowadzonych przez Habilitanta. Proponowany model teoretyczny badanego procesu ablacji wywołanego nanosekundowym impulsem lasera, Habilitant poddaje walidacji i kalibracji porównując wyznaczone numerycznie rozwiązania modelu z wynikami eksperymentalnych badań metodami profilometrycznymi i optycznymi. Dzięki uzyskanej dużej poprawności przewidywać zaproponowanego modelu, widać, że jest on efektywnym narzędziem do praktycznego określenia operacyjnych parametrów plazmy, które są trudne do wyznaczania eksperymentalnie (szczególnie w początkowym okresie kilkudziesięciu nanosekund), m.in. rozkładów ciśnienia, temperatury, gęstości i prędkości obłoku plazmowego. Model sprawdza się nie tylko dla popularnych materiałów jak węgiel czy aluminium, ale także dla materiałów dotychczas analizowanych rzadko, np. wolframu, boru czy renu, które mają duży potencjał aplikacyjny. Opracowany model umożliwia określenie wpływu długości fali promieniowania laserowego na parametry obłoku plazmowego. Habilitant wyjaśnił, że różnice w zachowaniu się obłoku plazmy podczas ablacji, dotyczące m.in. kształtu i wielkości, prędkości oraz temperatury obłoku zależą od masy pierwiastka, co wskazuje na głównie gazodynamiczny charakter ekspansji obłoku.

Część badań prowadzonych przez Habilitanta ma nowatorski charakter i jest oryginalna w skali światowej, m.in. osadzanie supertwardej krystalicznej warstwy dwuborku renu ReB_2 za pomocą nanosekundowego lasera Nd:YAG. Otrzymane wyniki badań wskazują na duży potencjał aplikacyjny metod badanych przez Autora do nanoszenia cienkich warstw.

Autor wyznacza rozwiązanie zaproponowanego modelu teoretycznego za pomocą komercyjnego oprogramowania Ansys – Fluent, obliczając ekspansję obłoku plazmowego w warunkach symetrii osiowej. Trzeba tu jednak dodać, że zaadoptowanie tego pakietu do analizowanego zjawiska wymagało od Habilitanta pogłębionej wiedzy z metod numerycznych i napisania kilku funkcji zewnętrznych UDF (User Defined Functions), dostosowanych do specyfiki analizowanego procesu ablacji, w szczególności zależności parametrów materiałowych od temperatury, która jest jedną z niewiadomych zadania początkowo-brzegowego.

Analizowany przez Habilitanta proces ablacji związany jest z przemianą fazową z fazy stałej (materiału tarczy) w fazę gazową (plazmowy obłok), jak również przemiany fazowej WB_2/B na WB_3 . Z matematycznego punktu widzenia są to problemy z poruszającym się brzegiem (ang. moving boundary problems), w których położenie poruszającej się powierzchni rozdzielającej dwie fazy stanowi dodatkową niewiadomą zadania. Autor aproksymuje udział objętościowy nowej fazy f_l liniową funkcją temperatury, tzn. $f_l = 0$, gdy $T \leq T_{sol}$; $f_l = 1$, gdy $T_{sol} \leq T$; oraz $f_l = (T - T_{sol}) / (T_{liq} - T_{sol})$, gdy $T_{sol} \leq T \leq T_{liq}$. Powstaje tu jednak naturalne pytanie, czy przyjęcie innej funkcji aproksymującej ewolucję

koncentracji fazy f_l nie poprawiłoby dokładności opisu przez model procesu ablacji, dając lepszą zgodność wyników numerycznych z wynikami pomiarów w testach laboratoryjnych? Chcę jednak podkreślić, że ta krytyczna uwaga nie obniża mojej wysokiej oceny tematyki badań i wyników uzyskanych przez Habilitanta, a należy ją raczej traktować jako wskazówkę odnośnie modelu obliczeniowego procesu ablacji w Jego dalszych badaniach.

Podsumowując ocenę osiągnięcia naukowo-badawczego przedstawionego w postępowaniu habilitacyjnym stwierdzam, że dotyczy ono aktualnego tematu badawczego o ważnych potencjalnych zastosowaniach w nowoczesnych technologiach materiałowych, zawiera przy tym wiele elementów oryginalnych i czyni zadość odpowiednim wymaganiom ustawowym, które należy spełnić ubiegając się o stopień naukowy doktora habilitowanego.

4. Ocena dorobku i aktywności naukowej

Pełny wykaz publikacji Habilitanta składa się z 40 pozycji. Habilitant jest autorem lub współautorem 22 artykułów opublikowanych w czasopismach znajdujących się na liście filadelfijskiej (JCR) o sumarycznym 5-letnim wskaźniku wpływu $IF = 28,13$, sumarycznej liczbie cytowań równej 69 i całkowitej liczbie punktów wg MNiSW wynoszącej 515. Po uzyskaniu stopnia doktora, oprócz publikacji ujętych w jednotematycznym cyklu, Habilitant jest współautorem 12 publikacji z listy JCR, w których autorski udział Habilitanta jest mniejszy i waha się od 5% do 80%. Podane liczby oznaczają znaczny wzrost aktywności badawczej i publikacyjnej po uzyskaniu stopnia doktoratu, bo Jego liczba publikacji z listy JCR przed lub w wyniku doktoratu wynosi 4, natomiast pozostałych recenzowanych artykułów i konferencyjnych abstraktów wynosi 3 przed doktoratem i 14 po doktoracie.

Liczba cytowań wszystkich prac Kandydata wynosi 72 (bez autocytowań) wg WoS, a indeks Hirscha $h = 7$. Należy tutaj też odnotować pozytywny fakt, że dorobek Habilitanta jest ciągle wzbogacany kolejnymi pracami, nie ujętymi we wniosku a rozszerzającymi tę tematykę badawczą, które potwierdzają Jego dalszą dużą aktywność naukową.

Prace dopełniającego dorobku naukowego Kandydata mieszczą się w Jego głównym obszarze badań naukowych, tj. dotyczą procesów ablacji i osadzania impulsem laserowym (ang. Pulsed Laser Ablation/Deposition – PLA/PLD), jak również pokrewnych zagadnień przetapiania laserowego (z nagniataniem) i przewodnościowego spawania materiałów różnoimiennych.

Habilitant uczestniczył (po uzyskaniu stopnia doktora) w 7 projektach badawczych i badawczo-rozwojowych, przy czym kierował jednym z tych projektów pt. „Super-twarde pokrycia osadzone impulsem laserowym” (NCN, Sonata, 2013-2016, 36 miesięcy).

Podsumowując dorobek i aktywność naukową dr. inż. Tomasza Mościckiego stwierdzam, że jest On aktywnym naukowcem posiadającym znaczny dorobek w dziedzinie teoretycznego i komputerowego modelowania oraz laboratoryjnego testowania procesów ablacji i osadzania impulsem laserowym. Warunek istotnej aktywności naukowej uważam za spełniony.



5. Ocena dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej

Autoreferat nie zawiera informacji na temat dorobku dydaktycznego Habilitanta. Brak też informacji o udziale w konferencjach i referatach wygłoszonych tam przez Kandydata. Wykaz publikacji obejmuje jednakże abstrakty konferencyjne, o których Kandydat podaje, że uczestniczył w ich opracowaniu.

Jest promotorem pomocniczym doktoranta mgr. inż. Rafała Banaka z Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, którego przewód doktorski „Analiza pola temperatur i kształtu strefy przetopieniowej w procesie spawania laserowego” został otwarty 11 grudnia 2014 r.

Habilitant nie przebywał na stażach w jednostkach zagranicznych, natomiast opracował dwie recenzje dla renomowanych czasopism wydawanych przez zagraniczne wydawnictwa (Elsevier, Springer).

Otrzymał dwa wyróżnienia Dyrektora IPPT PAN za publikacje w najwyżej punktowanych czasopismach, jedno w kategorii młodych pracowników (2012r.) a drugie w kategorii pracowników >35 lat (2016r.).

Podsumowując, całościowo potraktowany dorobek dr inż. Tomasza Mościckiego w obszarze działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej oraz współpracy międzynarodowej oceniam jako wystarczający.

6. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że jednotematyczny cykl publikacji pt. „Modelowanie numeryczne procesów zachodzących podczas ablacji nanosekundowym impulsem lasera” wraz z dodatkowym dorobkiem naukowym stanowi znaczny wkład dr. inż. Tomasza Mościckiego w rozwój mechaniki, w zakresie modelowania i doboru parametrów procesu ablacji oraz nakładania cienkich supertwardych warstw, i spełnia wymogi Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Habilitant wykazał się dużą aktywnością i umiejętnościami w prowadzeniu badań naukowych o wysokim stopniu złożoności i oryginalności, obejmujących sformułowanie teoretyczne, implementacje komputerowe i testy laboratoryjne.

Stawiam zatem wniosek o przyjęcie przedstawionych prac i dopuszczenie dr. inż. Tomasza Mościckiego do dalszych etapów postępowania celem nadania Mu stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie mechanika.

