

Prof. dr hab. Marcin Nabiałek
Politechnika Częstochowska
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Katedra Fizyki

Recenzja
of the doctoral dissertation of Mr. Upadesh Subedi, M.Sc., Eng.
Pod tytułem
"Towards Digital Twins for Quantifying Laser-Microstructure
Interface in Multicomponent Alloys Using Thermodynamic Tensor
Model"

Promotor rozprawy:
Dr hab. inż. Tomasz Tański, Prof. PŚ.
Promotor pomocniczy:
Dr. inż. Anil Kunwar

Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej dotyczącej powołania recenzentów w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych mgr. inż. Upadeshowi Subediemu. Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska wykonana na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej pod kierunkiem dra hab. inż. Tomasza Tańskiego, prof. PŚ oraz promotora pomocniczego dr inż. Anila Kunwara.

Wybór tematu pracy na tle stanu badań

Rozwój technologii przyrostowych, obróbki laserowej oraz nowoczesnych metod modelowania procesów materiałowych należy obecnie do najbardziej dynamicznie rozwijających się kierunków badań z zakresu inżynierii materiałowej. W ostatnich latach szczególnego znaczenia nabrały zagadnienia związane z wykorzystaniem sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego oraz koncepcji cyfrowych bliźniaków (Digital Twins) do projektowania materiałów i procesów technologicznych.

Tematyka podjęta przez Doktoranta dotyczy ilościowego opisu oddziaływania wiązki laserowej z mikrostrukturą wieloskładnikowych stopów metali oraz opracowania metod umożliwiających tworzenie cyfrowych bliźniaków tych procesów. Zagadnienie to znajduje się w głównym nurcie współczesnych badań światowych i stanowi naturalne połączenie inżynierii

materiałowej, fizyki materiałów, termodynamiki obliczeniowej, modelowania oraz metod sztucznej inteligencji.

Należy podkreślić, że pomimo bardzo intensywnego rozwoju metod modelowania numerycznego nadal istnieje istotna luka pomiędzy dokładnymi modelami fizycznymi a możliwością ich wykorzystania w czasie rzeczywistym podczas procesów technologicznych. Próba połączenia metod phase-field, tensorowej reprezentacji danych oraz uczenia maszynowego stanowi interesujące i nowoczesne podejście badawcze.

W mojej opinii wybór tematyki rozprawy jest trafny, aktualny i posiada zarówno znaczenie poznawcze, jak i potencjał aplikacyjny.

Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa została przygotowana w formie zbioru tematycznie powiązanych publikacji naukowych.

Rozprawa liczy łącznie 141 stron i składa się z części opisowej zawierającej wprowadzenie do problematyki badawczej, cele pracy, hipotezy naukowe, omówienie zagadnienia naukowego oraz syntezę najważniejszych wyników uzyskanych w ramach pięciu publikacji stanowiących podstawę rozprawy.

W skład osiągnięcia naukowego wchodzi następujące artykuły:

- 1. *Scripta Materialia* (2024),**
- 2. *Materials & Design* (2024),**
- 3. *Engineering with Computers* (2025),**
- 4. *Computational Materials Science* (2025),**
- 5. *Computational Materials Science* (2025).**

Należy podkreślić, że wszystkie publikacje zostały opublikowane w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, w indeksowanych bazach: Web of Science i Scopus.

Rozprawa posiada logiczny układ i została przygotowana w sposób przejrzysty. Poszczególne rozdziały prowadzą czytelnika od przedstawienia problemu badawczego poprzez założenia teoretyczne, aż do omówienia uzyskanych wyników.

Spis literaturowy przedmiotu

Bibliografia wykorzystana w rozprawie obejmuje szeroki zakres literatury związanej z modelowaniem metodą pola fazowego, termodynamiką materiałów, technologiami laserowymi, uczeniem maszynowym oraz koncepcją cyfrowych bliźniaków.

Dobór źródeł literaturowych należy uznać za prawidłowy i odpowiadający tematyce rozprawy. Cytowane publikacje pochodzą głównie z ostatnich lat, co świadczy o aktualności prowadzonych badań.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że znaczna część przywołanych publikacji została opublikowana w wysoko punktowanych czasopismach naukowych.

Nie stwierdzam istotnych braków w zakresie doboru literatury.

Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi nowoczesne i interdyscyplinarne opracowanie naukowe łączące zagadnienia inżynierii materiałowej, termodynamiki obliczeniowej, modelowania pola fazowego, mechaniki ośrodków ciągłych oraz metod sztucznej inteligencji. Doktorant podjął się bardzo ambitnego zadania polegającego na opracowaniu uniwersalnego podejścia umożliwiającego ilościowy opis interakcji pomiędzy wiązką laserową a rozwijającą się mikrostrukturą wieloskładnikowych stopów metali.

Praca została przygotowana w formie cyklu publikacji naukowych, co obecnie stanowi jedną z najbardziej wymagających form przygotowania rozpraw doktorskich. Wszystkie artykuły zostały opublikowane w renomowanych czasopismach międzynarodowych, a ich tematyka tworzy logicznie powiązaną całość badawczą.

Pierwszy artykuł poświęcony został opracowaniu metody tensorowej reprezentacji danych mikrostrukturalnych dla stopów Ti-Cr wykorzystywanych między innymi w implantologii stomatologicznej. Autor wykorzystał modelowanie metodą pola fazowego do opisu procesów rozdziału fazowego oraz zaproponował procedurę kompresji danych opartą o dekompozycję tensorową. Uzyskano znaczną redukcję wielkości zbiorów danych przy zachowaniu wysokiej zgodności rekonstruowanych mikrostruktur z wynikami pierwotnych obliczeń.

Opracowanie to należy uznać za wartościowy wkład w rozwój metod cyfrowego projektowania materiałów.

Drugi artykuł dotyczy modelowania wzrostu faz międzymetalicznych Ti_2Cu w osnowie stopu Ti-6Al-4V podczas procesów laserowego przetwarzania materiałów. W pracy przedstawiono zależności pomiędzy parametrami procesu technologicznego a morfologią oraz kinetyką wzrostu faz międzymetalicznych. Uzyskane wyniki posiadają zarówno znaczenie poznawcze, jak i potencjał aplikacyjny związany z rozwojem technologii przyrostowych.

W trzeciej publikacji Autor wykorzystał architekturę Conv-LSTM do prognozowania wieloetapowej ewolucji mikrostruktury. Jest to zagadnienie bardzo aktualne, wpisujące się w światowy trend wykorzystania metod uczenia maszynowego do przewidywania procesów materiałowych. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że opracowane modele nie ograniczają się jedynie do klasycznej analizy obrazów, lecz uwzględniają fizyczny charakter zachodzących procesów. Osiągnięte rezultaty wskazują na możliwość znaczącego skrócenia czasu obliczeń w porównaniu do klasycznych metod numerycznych.

Czwarta publikacja poświęcona została opracowaniu nieizotermicznego wielofazowego modelu pola fazowego opisującego oddziaływanie wiązki laserowej ze stopem Ti-Au. Autor przeanalizował jednoczesny wpływ transportu ciepła, dyfuzji składników stopowych, procesów krystalizacji oraz tworzenia faz międzymetalicznych Ti_3Au . Badania te wymagają bardzo dobrej znajomości termodynamiki materiałów oraz metod numerycznych i należy je ocenić bardzo wysoko pod względem naukowym.

Ostatnia publikacja stanowi naturalne rozwinięcie wcześniejszych badań i koncentruje się na zagadnieniach związanych z predykcją pól fazowych oraz pól prędkości w procesach laserowego przetwarzania materiałów. Autor zastosował architekturę U-Net do przewidywania rozkładów mikrostrukturalnych oraz parametrów przepływu cieczy w jeziorce ciekłego metalu. Uzyskane wyniki wskazują, że opracowane modele mogą stanowić podstawę przyszłych systemów sterowania procesami technologicznymi w czasie rzeczywistym.

Najważniejszym osiągnięciem naukowym Doktoranta jest opracowanie autorskiej koncepcji określonej jako **Thermodynamic Tensor Model**. Zapropionowane rozwiązanie umożliwia

reprezentację danych mikrostrukturalnych w sposób zachowujący informacje o przestrzenno-czasowej ewolucji układu przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów obliczeniowych. W mojej ocenie jest to oryginalne rozwiązanie naukowe posiadające potencjał dalszego rozwoju.

Na szczególne podkreślenie zasługuje również wysoki poziom metodologiczny przeprowadzonych badań. Autor wykorzystał zaawansowane narzędzia obliczeniowe obejmujące modelowanie pola fazowego, metody elementów skończonych, obliczenia termodynamiczne CALPHAD, analizę tensorową oraz nowoczesne algorytmy uczenia maszynowego. Tak szeroki zakres kompetencji spotykany jest stosunkowo rzadko na etapie przygotowywania rozpraw doktorskich.

Dorobek publikacyjny będący podstawą rozprawy został opublikowany w czasopismach o wysokiej renomie międzynarodowej, takich jak **Scripta Materialia**, **Materials & Design**, **Engineering with Computers** czy **Computational Materials Science**. Szczególnie istotny jest fakt, że w większości publikacji Doktorant pełni rolę pierwszego autora, a jego udział w przygotowaniu prac wynosi od 70% do ponad 72%, co jednoznacznie wskazuje na dominującą rolę w realizacji badań.

Uzyskane wyniki badań mają charakter nowatorski i stanowią istotny wkład w rozwój wiedzy z zakresu modelowania procesów zachodzących podczas laserowego przetwarzania materiałów. Przedstawiona rozprawa potwierdza bardzo dobre przygotowanie naukowe Doktoranta oraz jego zdolność do samodzielnego prowadzenia zaawansowanych badań naukowych.

Ocena dorobku publikacyjnego stanowiącego podstawę rozprawy

Osiągnięcie naukowe stanowi cykl pięciu publikacji o łącznej wartości 760 punktów według systemu ewaluacji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz o skumulowanym współczynniku Impact Factor wynoszącym około 29,3.

No.	Journal	Year	Ministry Evaluation Points*	Impact Factor
I	<i>Scripta Materialia</i>	2024	200	6.3
II	<i>Materials & Design</i>	2024	140	8.4
III	<i>Engineering with Computers</i>	2025	140	8.0
IV	<i>Computational Materials Science</i>	2025	140	3.3
V	<i>Computational Materials Science</i>	2025	140	3.3

Należy podkreślić, że czasopisma, w których opublikowano przedstawione prace, należą do czołowych międzynarodowych czasopism z zakresu inżynierii materiałowej, obliczeniowej nauki o materiałach oraz modelowania numerycznego. Szczególnie istotny jest fakt, że Doktorant jest pierwszym autorem czterech z pięciu publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej.

Deklarowany udział Doktoranta w powstaniu poszczególnych publikacji obejmuje:

Praca I – 71%
Praca II – 16%
Praca III – 72%
Praca IV – 70%
Praca V – 60%

Chociaż udział Doktoranta w przygotowaniu publikacji II jest mniejszy niż w pozostałych pracach, całokształt dorobku publikacyjnego jednoznacznie potwierdza jego wiodącą rolę w realizacji przedstawionych badań. Świadczy o tym dominujący wkład w cztery publikacje oraz odpowiedzialność za opracowanie koncepcji badawczej, implementację modeli numerycznych, analizę danych, interpretację uzyskanych wyników oraz przygotowanie manuskryptów.

W mojej ocenie poziom naukowy publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej jest bardzo wysoki i wyraźnie przewyższa minimalne wymagania stawiane kandydatom ubiegającym się o stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

Critical Remarks

Pomimo bardzo wysokiego poziomu rozprawy, chciałbym przedstawić kilka uwag o charakterze dyskusyjnym:

1. Znaczna część rozprawy opiera się na modelowaniu obliczeniowym, natomiast zakres eksperymentalnej weryfikacji uzyskanych wyników mógłby być szerszy.

2. W niektórych fragmentach rozprawy koncepcja *Digital Twin* została przedstawiona bardziej w kontekście przyszłych możliwości jej rozwoju niż praktycznej implementacji w warunkach przemysłowych.

3. Więcej uwagi można było poświęcić ograniczeniom wynikającym z rzeczywistych warunków prowadzenia procesów technologicznych w skali przemysłowej.

4. Bardziej szczegółowego omówienia wymagałaby możliwość przeniesienia opracowanych modeli uczenia maszynowego na inne układy materiałowe.

Powyższe uwagi mają wyłącznie charakter dyskusyjny i w żaden sposób nie wpływają na moją jednoznacznie pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej.

Ocena końcowa i wniosek

Rozprawa doktorska pt. „Towards Digital Twins for Quantifying Laser-Microstructure Interface in Multicomponent Alloys Using Thermodynamic Tensor Model” stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, bardzo dobrą znajomością zaawansowanych metod obliczeniowych oraz zdolnością do krytycznej analizy uzyskanych wyników naukowych.

W mojej ocenie osiągnięcia naukowe przedstawione w rozprawie wyraźnie przewyższają poziom zwyczajowo oczekiwany od kandydatów ubiegających się o stopień doktora, dlatego rozprawa zasługuje na wyróżnienie.

Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

W związku z powyższym **wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Upadesha Subediego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.** Jednocześnie, mając na uwadze wysoki poziom naukowy rozprawy oraz wartość uzyskanych wyników, wnoszę o wyróżnienie przedłożonej rozprawy doktorskiej.



Prof. dr hab. Marcin Nabiałek