

prof. dr hab. inż. Krzysztof T. Wojciechowski
Laboratorium Badań Termoelektrycznych
Katedra Chemii Nieorganicznej
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr. Mohsena Dehbashiego

pt. „Predicting and Analyzing the Thermal and Electrical Properties of Materials Using Advanced Machine Learning Models”

1. Informacje ogólne

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Mohsena Dehbashiego została przygotowana w Instytucie Fizyki, Centrum Naukowo-Dydaktycznym Politechniki Śląskiej (Silesian University of Technology) w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Jerzy Bodzenta, natomiast promotorem pomocniczym jest dr inż. Justyna Juszczak-Synowiec.

Rozprawa została napisana w języku angielskim i ma charakter monografii opartej na częściowo opublikowanych wynikach prac naukowych. Praca liczy łącznie 104 strony, składa się z 9 rozdziałów, 3 aneksów zawierających dane źródłowe, opis użytych bibliotek numerycznych i źródeł algorytmów, spis dorobku naukowego i nagród oraz spis literaturowy zawierający 74 pozycje.

Rozprawa zawiera wyniki zawarte w dwóch artykułach naukowych opublikowanych w 2 recenzowanych czasopismach naukowych: *International Journal of Heat and Mass Transfer* (Elsevier) oraz *Materials* (MDPI). W pierwszej z nich doktorant jest pierwszym autorem. Dodatkowo część wyników Autor pracy opublikował w monografii: *Interdyscyplinarne badania młodych naukowców* (Politechnika Śląska, No. 987, pp. 81–91). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

2. Charakterystyka problematyki i kontekstu naukowego

Rozprawa dotyczy zastosowania metod uczenia maszynowego do poprawy dokładności i powtarzalności wyznaczania przewodnictwa cieplnego (TC) oraz przewodnictwa elektrycznego (EC) w cienkich warstwach. Punktem wyjścia pracy nie jest opracowanie nowych technik pomiarowych *sensu stricto*, lecz analiza ograniczeń istniejących metod pomiarowych (S_{Th}M w odniesieniu do TC oraz 4PP w odniesieniu do EC) oraz próba redukcji błędów systematycznych i geometrycznych poprzez wykorzystanie modeli predykcyjnych uczonych na danych eksperymentalnych.

Problematyka pracy jest aktualna i odpowiada wyraźnie artykułowemu w literaturze potrzebom w zakresie zwiększenia wiarygodności lokalnych pomiarów właściwości cieplnych i elektrycznych w strukturach cienkowarstwowych i nanometrycznych. Współczesne techniki skaningowe oferują wysoką rozdzielczość przestrzenną, jednak interpretacja mierzonych parametrów obarczona jest niepewnościami wynikającymi z geometrii kontaktu, topografii, efektów brzegowych oraz oddziaływania z podłożem. W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój podejść opartych na analizie danych i metodach uczenia maszynowego, których celem jest poprawa jakości estymacji parametrów fizycznych bez konieczności radykalnej modyfikacji aparatury pomiarowej.

Rozprawa została zrealizowana w ośrodku o wysokiej, międzynarodowej randze w zakresie badań nad technikami skaningowej mikroskopii termicznej oraz pomiarami właściwości elektrycznych materiałów w skali mikro- i nanometrycznej. Zespół ten należy do rozpoznawalnych w świecie grup rozwijających zarówno instrumentację S_{Th}M, jak i inne metody analizy sygnałów pomiarowych w

nanoskali. Tematyka dysertacji wpisuje się bezpośrednio w ten profil badawczy i stanowi rozwinięcie nurtu prac ukierunkowanych na zwiększenie dokładności interpretacji lokalnych pomiarów transportowych poprzez wykorzystanie zaawansowanych metod analizy danych (*machine learning* – ML).

3. Ocena merytoryczna pracy

Wprowadzenie do problemu badawczego

Rozdziały 1 i 2 rozprawy mają charakter wprowadzający i obejmują ogólną charakterystykę transportu cieplnego i elektrycznego w cienkich warstwach oraz podstawy technik pomiarowych (S_{Th}M, 4PP) wykorzystywanych w dalszej części pracy. Autor wskazuje na trudności związane z wyznaczaniem przewodnictwa cieplnego i elektrycznego w cienkich warstwach, podkreślając wpływ topografii powierzchni, oddziaływania z podłożem, oporów kontaktowych oraz ograniczeń klasycznych modeli interpretacyjnych. Problem został zarysowany obszernie w sposób opisowy i osadzony w realnych trudnościach metrologicznych.

Tło prac badawczych (Research Background)

Pomimo obszernego wstępu, przegląd aktualnego stanu wiedzy w odniesieniu do światowych badań nad metodami wyznaczania TC i EC, przedstawiony w rozdziale 3, charakter bardzo skrótowy (2,5 strony; 11 pozycji dla TC i 7 dla EC) co nie pozwala na pełne osadzenie rozprawy w kontekście najnowszych prac w tej tematyce. Autor przedstawia w nim znane trudności fizyczne związane z wyznaczaniem przewodnictwa cieplnego i elektrycznego metodami S_{Th}M i 4PP (takie jak np.: wpływ topografii powierzchni, niejednoznaczność warunków kontaktu sonda–próbka itp).

Nie odnosi się natomiast w wystarczającym stopniu do kluczowej kwestii: **w jaki sposób metody ML są używane do rozwiązywania konkretnych problemów metrologicznych w inżynierii materiałowej**. Przydałyby się odniesienia do rozwijanych w ostatnich latach podejść *data-driven* i *surrogate modeling* stosowanych do analizy sygnału S_{Th}M, w tym prac łączących FEM z aproksymacją odpowiedzi sondy oraz wykorzystaniem ML. Podobnie w obszarze pomiarów elektrycznych pominięto całkowicie literaturę dotyczącą korekcji geometrycznych (analitycznych i FEM) dla metod 4PP i van der Pauwa, również dla nieidealnych geometrii.

Brak tych odniesień i porównania z istniejącymi rozwiązaniami może sugerować pionierski charakter proponowanej metody, podczas gdy kierunek *data-driven* w analizie pomiarów transportowych jest już ugruntowany w literaturze.

Cele badawcze i tezy (*research hypotheses*)

Cele badawcze zdefiniowane w rozdziale 4 mają charakter metodologiczny i dotyczą opracowania zintegrowanej procedury łączącej mapowanie przestrzenne, deskryptory topograficzne, normalizację sygnału oraz modele uczenia maszynowego. Tezy badawcze zostały sformułowane również w sposób opisowy. Zakładają one, że integracja wskazanych elementów prowadzi do zwiększenia dokładności, wiarygodności oraz powtarzalności wyznaczania parametrów transportowych. Z uwagi jednak na metodologiczny charakter ocenianej rozprawy Recenzent oczekiwałby **precyzyjnych operacyjnych kryteriów ich weryfikacji**, w szczególności: względem jakiego modelu definiowana jest poprawa, jaka miara błędu została przyjęta oraz w jakim zakresie parametrów formułowane wnioski zachowują swoją ważność?

4. Badania własne

Opis badań własnych Autora rozprawy został wyraźnie podzielony na dwa symetrycznie skonstruowane działy: analizy przewodnictwa cieplnego (TC) oraz przewodnictwa elektrycznego (EC). Recenzent zachowa w niniejszej opinii analogiczny podział, łącząc w razie potrzeby elementy wspólne dla obu zagadnień.

Materiały badawcze i referencyjne

Zarówno w rozdziale 5 (TC) jak i w 7 (EC) informacje dotyczące materiałów zostały przedstawione łącznie z opisem odpowiedniej aparatury oraz konfiguracji pomiarowych. Strukturalnie połączenie obu aspektów utrudnia analizę metodologiczną, ponieważ nie wyodrębniono odrębnej części poświęconej wyłącznie próbkom, obejmującej ich pochodzenie, technologię wytwarzania, parametry fizyczne oraz kryteria doboru. W pracy doktorskiej należałoby oczekiwać wyraźnego rozdziału charakterystyki materiałów badawczych i referencyjnych od charakterystyki aparatury i procedur pomiarowych.

Informacje o próbkach są niepełne i niesystematyczne. Nie określono jasno kryteriów doboru materiałów (zarówno dla TC jak EC), zakresu przewodności, roli grubości warstw ani tego, czy zbiory zaprojektowano pod kątem reprezentatywnego trenowania modeli ML, co utrudnia ocenę adekwatności bazy danych.

Kluczowym aspektem jest pochodzenie próbek materiałowych oraz źródła danych wejściowych do trenowania i testowania modeli regresyjnych. Sprawa ta nie została jednoznacznie opisana a **przede wszystkim niejasny jest udział Autora w przygotowaniu, charakterystyce mikrostrukturalnej i pomiarach właściwości transportowych próbek**. Te zagadnienia są ważne, jeśli praca jest oceniana w dyscyplinie inżynierii materiałowej.

Osią metodologiczną planu badań zarówno dla TC jak i EC jest odniesienie parametrów estymowanych nowymi metodami w stosunku do referencyjnych wartości materiałowych zawartych w pracach [54]-[58]. Odniesienia zawarte w tabelach 5.1, 6.4, 7-1 do wartości literaturowych mogą być jednak zwodnicze. Należy wyjaśnić, że nie są to zewnętrzne dane uzyskane przez niezależne grupy badawcze, ale dane otrzymane przez zespół, w którym pracował doktorant. Ponadto, w przypadku niektórych próbek litych (Tabele 5.1, 6.4) oraz próbek metalicznych (Table 7-1) – nie zostało jawnie podane źródło niektórych danych referencyjnych ani też nie podano dokładności parametrów referencyjnych κ oraz σ_{actual} . Jest to istotne zagadnienie w pracy metrologicznej, niosące konsekwencje dla końcowych wniosków w kontekście stawianych hipotez badawczych.

Należy więc wyjaśnić jednoznacznie następujące zagadnienia:

Czy dane pochodzą dokładnie z tych samych próbek, na których zostały wyznaczone wartości referencyjne κ oraz σ_{actual} czy też były to inne próbki wytworzone przez Autora z tych samych materiałów i tą samą metodą?

Czy dane treningowe i testowe zostały pozyskane na innych obszarach próbek referencyjnych, czy też wprost użyto danych źródłowych autorów cytowanych publikacji z których bezpośrednio wyznaczono wartości referencyjne κ oraz σ_{actual} ?

Jakie jest pochodzenie danych referencyjnych κ dla próbek litych (bulk): szkło, węgiel szklisty, SIC, YAG (Table, 5.1 i 6.4) oraz σ_{actual} dla próbek metalicznych (Table 7-1)?

W przypadku metody EC (rozdział 7) parametrem referencyjnym było przewodnictwo elektryczne σ_{actual} mierzone referencyjną metodą van der Pauwa (vdP). W celu porównania wykonano pomiary na seriach próbek podobnym urządzeniem w konfiguracji 4PP. W związku z tym pojawia się ponownie pytanie:

Czy próbki użyte w pomiarach 4PP są dokładnie tymi samymi, dla których wcześniej wyznaczono σ_{actual} metodą van der Pauwa (ref. [55]) czy też pochodzą z innej partii technologicznej?

W przypadku cienkich warstw (np. ITO) przewodnictwo elektryczne jest silnie zależne od grubości, parametrów procesu technologicznego, zawartości domieszek, mikrostruktury i innych czynników. Różnice w tych parametrach mogą istotnie wpływać na σ . Dlatego należy zwrócić uwagę na aspekt starzenia się materiału. Jeżeli pomiary vdP stanowiące źródło σ_{actual} zostały wykonane np. kilka miesięcy wcześniej i próbki były przechowywane przez ten czas, to w przypadku cienkich warstw należy liczyć się z możliwością zmian właściwości elektrycznych (np. wskutek procesów utleniania, relaksacji naprężeń, zmian koncentracji nośników).

Czy zweryfikowano stabilność przewodnictwa w czasie przed wykorzystaniem wartości σ_{actual} jako referencyjnych?

Metodologia pomiarów

W rozdziałach 5 i 7 opisano obszernie kluczowe części metodologiczne związane z implementacją zespołowych modeli regresyjnych (*ensemble learning: Random Forest, Gradient Boosting*) do estymacji odpowiednio TC i EC w oparciu o gotowe biblioteki algorytmów. Co do zasady implementacja modeli została wykonana w sposób prawidłowy. Recenzentowi brakuje jednak kluczowych i informacji uzasadniających np.: wybór modeli (RF/GB), jednoznacznych informacji na temat sposobu podziału danych na treningowe i testowe, procedurze walidacji i ustawieniach implementacyjnych. W szczególności recenzent bardzo odczuł brak syntetycznych diagramów *workflow*, dla obu części TC i EC, które w sposób jednoznaczny przedstawiałyby sekwencję działań: od akwizycji danych, przez wstępne przetwarzanie i ekstrakcję deskryptorów, po trenowanie, walidację i ocenę generalizacji modeli. Takie schematy zdecydowanie ułatwiłyby ocenę spójności procedur, poziomu rozdziału danych oraz miejsc, w których mogło dojść do potencjalnego przecieku informacji między zbiorem treningowym a testowym.

Zbiory treningowe i testowe

Sprawa jednoznacznej definicji i rozróżnienia pomiędzy zbiorów treningowych a testowych. Autor dla części TC podaje jedynie licznosc zbiorów treningowego – 2352 pomiary oraz testowego – 980 pomiarów **bez wskazania sposobu podziału**. W tej sytuacji nie można ocenić ryzyka przecieku informacyjnego oraz jakości predykcyjnej modelu. W związku z tym proszę o jednoznaczne odniesienie się do następujących kwestii:

1. Schemat podziału danych

Czy podział 3332 rekordów na 2352 (training) i 980 (testing) był realizowany na poziomie pojedynczych rekordów, czy całych próbek materiałowych (map pomiarowych)?

(czy np. wydzielono 5 materiałów (980 punktów), które nie były brane pod uwagę w treningu czy też losowo wybrano 980 rekordów z całej puli danych?)

Czy w zbiorze testowym znajdowały się rekordy pochodzące z tych samych próbek (materiałów), które były obecne w zbiorze treningowym?

2. Autokorelacja przestrzenna wynikająca z procedury filtrującej

W celu redukcji szumu pomiarowego zastosowano procedurę uśredniania w oparciu o tzw. filtr „przesuwnego okna” 3x3. Jednak algorytm ten generuje silnie nakładające się obszary analizy o

wysokiej współzależności przestrzennej, co może prowadzić do przecieku danych i w efekcie do zawyżania wartości współczynnika korelacji R^2 .

Czy przy podziale na próbki treningowe/testowe zastosowano mechanizm zapobiegający przeciekowi przestrzennemu (np. podział blokowy mapy lub grupowanie rekordów według próbki)?

3. Niezależność zmiennej docelowej χ

Zmienna docelowa $\chi = \kappa_s/\sigma_i$ jest konstruowana z wielkości powiązanych z tymi samymi mapami pomiarowymi, z których wyznaczane są cechy wejściowe, co może istotnie wpływać na wynikowy współczynnik korelacji R^2 .

Czy κ_s użyte do konstrukcji χ było w pełni niezależnym pomiarem referencyjnym, czy pochodziło z tej samej procedury pomiarowej/kalibracyjnej co cechy wejściowe (Γ_i , $\Delta\phi_i$, parametry topograficzne)?

4. Kolejność operacji przetwarzania danych

Nie podano, czy normalizacja, selekcja cech (analiza korelacji Spearmana) oraz inne operacje były wykonywane przed czy po podziale danych. Ma to znaczenie, jeśli chodzi o wpływ na współczynnik korelacji R^2 .

Inaczej mówiąc: Czy wszystkie operacje preprocessing (normalizacja, selekcja cech, obliczenie parametrów pochodnych) były wykonywane w ten sam sposób na zbiorze treningowym jak na zbiorze testowym?

5. Walidacja międzymateriałowa

W obecnym opisie procedury dla TC nie można wykluczyć, że raportowana wartość $R^2 = 0.966$ została uzyskana w warunkach istotnego przecieku informacyjnego (autokorelacja przestrzenna okien 3×3 , możliwy podział rekordowy zamiast grupowego, brak jednoznacznego rozróżnienia pomiędzy preprocessingiem a właściwą analizą sygnału). W takim scenariuszu R^2 mierzy zgodność wewnątrzzbiorową przy silnie współzależnych obserwacjach, a nie zdolność modelu do predykcji dla nowych materiałów lub niezależnych map.

W konsekwencji teza o „wysokiej predykcyjnej skuteczności” i „skalowalnym frameworku” nie jest metodologicznie obroniona bez wykazania walidacji grupowej. **Bez takiej weryfikacji wysoka wartość R^2 nie może być traktowana jako dowód generalizacyjnej mocy modelu.** Pojawia się więc ważne pytanie:

Czy przeprowadzono walidację krzyżową typu *leave-one-material-out* lub *GroupKFold* z grupowaniem po próbce materiału?

Wyniki i dyskusja (Thermal Conductivity)

Rozdział 6 przedstawia zastosowanie zespołowych modeli regresyjnych do predykcji przewodnictwa cieplnego na podstawie danych SThM i deskryptorów topograficznych. Autor wykazuje redukcję RMSE oraz lepszą zgodność predicted vs actual κ względem podejścia nekorygowanego, zarówno dla zbioru treningowego, jak i testowego, co liczbowo wspiera tezę o poprawie estymacji TC. Jednocześnie interpretacja tych wyników wymaga doprecyzowania kilku kluczowych kwestii.

Czy przeprowadzono analizę wrażliwości wyników na zmianę hiperparametrów (np. `max_depth`, `learning_rate`), a jeśli tak – czy uzyskana redukcja RMSE jest stabilna w szerokim zakresie ich wartości?

Bez takiej analizy trudno jednoznacznie ocenić, czy uzyskane wyniki mają charakter niezależny od hiperparametrów, czy są związane z konkretną konfiguracją modelu.

Zwraca uwagę ekstremalnie dużą maksymalną głębokość drzewa ($\text{max_depth} = 419$) w stosunku do kilkunastu próbek materiałowych. Taka konfiguracja oznacza model o bardzo dużej złożoności, który może bardzo dokładnie dopasować dane treningowe (efekt przeuczenia). W tej sytuacji sama wysoka wartość R^2 — nawet przy niewielkiej różnicy między treningiem a testem — nie jest wystarczającym dowodem dobrej generalizacji. **Proszę o wyjaśnienie, dlaczego przyjęto tak wyjątkowo dużą głębokość oraz jak sprawdzono, że uzyskane R^2 nie wynika z nadmiernej złożoności modelu.**

Autor zastosował dwa modele – *Random Forest* oraz *Gradient Boosting* – i porównał ich skuteczność głównie na podstawie metryk błędu.

Na jakiej podstawie wybrano te algorytmy jako właściwe dla analizowanego problemu?

Brakuje pogłębionej dyskusji dotyczącej adekwatności tych metod do charakteru danych. W szczególności przy ograniczonej liczbie niezależnych próbek materiałowych należałoby przedyskutować podatność modeli na przeuczenie oraz ich zdolność do uogólnienia.

Podsumowanie (Thermal Conductivity)

Podsumowując część dotyczącą TC, Autor dokumentuje poprawę modeli ML w sensie zgodności numerycznej z przyjętą wartością referencyjną κ_{actual} , mierzoną redukcją RMSE oraz wzrostem R^2 . Nie wykazano jednak w sposób jednoznaczny, że poprawa ta ma charakter statystycznie uogólnialny między niezależnymi próbkami materiałowymi ani że przekracza poziom niepewności wartości referencyjnych. W obecnej postaci wyniki potwierdzają skuteczność dopasowania w obrębie analizowanego zbioru danych (charakter estymacyjny), natomiast zakres ich predykcyjności między materiałami nie został wystarczająco udokumentowany.

Metodologia pomiarów przewodnictwa elektrycznego (EC, 4PP)

Rozdział 7.3 przedstawia konstrukcję modeli ML (*Random Forest* oraz *Gradient Boosting*) służących do korekty wyników pomiarów 4PP w nieregularnej geometrii próbki oraz zróżnicowanego pozycjonowania sond (A1–A4, rotacje).

W opisie nie podano informacji o kontroli jakości kontaktu elektrycznego ani o warunkach brzegowych pomiaru. Nie wiadomo czy monitorowano stabilność kontaktu, siłę docisku sond oraz ewentualne uszkodzenia warstwy przy wielokrotnych pomiarach. Powstaje pytanie: **czy w analizie uwzględniono wpływ rezystancji i stabilności kontaktu oraz czy wprowadzono kryteria odrzucania pomiarów odstających?**

Nie przedstawiono jednoznacznie sposobu wyznaczania przewodnictwa z charakterystyk V–I. Nie wiadomo, czy stosowano pełną regresję liniową dla kilku wartości prądu ani czy testowano liniowość odpowiedzi. Należy zatem wyjaśnić: **czy przewodnictwo wyznaczano z nachylenia charakterystyki V–I oraz jaka była powtarzalność wyników dla tej samej konfiguracji geometrycznej (w tym przy rotacjach próbki)?**

Autor wprowadza zmienną pośrednią Θ , przewidywaną na podstawie parametrów geometrycznych oraz prądu, a następnie wykorzystuje ją do wyznaczenia przewodnictwa σ_{ML} . Zmienna Θ – choć formalnie wprowadzona – nie została jednoznacznie zinterpretowana. Z równań wynika jej rola jako współczynnika korekcyjnego, jednak nie wyjaśniono wprost, czy Θ stanowi aproksymację relacji wynikającej z modelu FEM, czy bezpośrednio odwzorowuje zależność między σ_{exp} a σ_{actual} .

Należy zatem zapytać: **jak definiowana jest Θ w danych treningowych oraz jaki jest jej fizyczny lub algorytmiczny status?**

Analiza statystyczna

Istotną kwestią o znaczeniu metrologicznym w pracy jest jakość opracowania statystycznego wyników. Jak wspomniano, wartości referencyjne zaczerpnięte z literatury σ_{actual} , (jak i κ_{actual}) podano **bez niepewności pomiarowych**. Autor wykazuje poprawę parametrów w kierunku σ_{actual} . Przy braku informacji nt. błędów pomiarowych parametrów referencyjnych poprawa niekoniecznie przekłada się na wyższą wiarygodność pomiaru.

Symetrycznym problemem jest brak analizy propagacji niepewności wejściowych na wartości σ_{ML} . Na wynik estymacji mają przecież wpływ m.in błędy pozycjonowania sond, wyznaczenia geometrii oraz grubości d na σ_{ML} . Nie pokazano, czy model ML tłumi czy wzmacnia fluktuacje pomiarowe i jak wrażliwy jest na zaburzenia parametrów wejściowych.

Należy zatem wprost zapytać: **czy przeprowadzono analizę wrażliwości/propagacji błędów (np. dla niepewności L_h , L_v , d) oraz czy można ilościowo określić stabilność σ_{ML} względem realistycznych błędów wejściowych?**

Ogólne uwagi redakcyjne

Niezależnie od oceny merytorycznej rozprawy Recenzent chciałby zwrócić uwagę na istotne uchybienia redakcyjne i formalne, które wpływają na przejrzystość pracy a co za tym komfort jej analizy dla czytelnika.

Po pierwsze w przedstawionej wersji pracy **brak jest klasycznej strony tytułowej zawierającej pełne dane identyfikacyjne rozprawy** (imię i nazwisko autora, jednostka organizacyjną, nazwiska i tytuły promotora i promotora pomocniczego, rok i miejsce złożenia pracy). Strona taka stanowi standardowy element dokumentu doktorskiego i pełni funkcję formalno-archiwizacyjną. **Jej brak należy uznać za uchybienie formalne.**

Po drugie, w pracy brakuje listy oznaczeń (List of Symbols). W tekście stosowane są liczne symbole (m.in. dla przewodnictwa w różnych wariantach: *experimental/apparent, actual, corrected*; w części TC i EC; zmienne pośrednie takie jak Θ), jednak nie zostały one zebrane w jednym miejscu wraz z jednoznaczną definicją i jednostkami. W pracy o charakterze metrologicznym i modelowym brak takiego zestawienia bardzo utrudnia kontrolę spójności formalizmu oraz jednoznaczną interpretację równań. Zamieszanie wprowadza też niespójność terminologii i nazewnictwa wielkości fizycznych (np. różne określenia dla tej samej kategorii przewodnictwa).

Zdaniem recenzenta rozdziały opisujące metodyki zawierają nadmierną ilość treści podręcznikowych (definicje korelacji, ogólne podstawy modeli zespołowych), które nie stanowią elementu badań własnych i mogłyby zostać przeniesione do części wprowadzającej. Obecna struktura zaciera granicę między tłem teoretycznym a rzeczywistym wkładem Autora.

Wskazane uchybienia redakcyjne nie podważają wartości merytorycznej pracy, jednak obniżają jej przejrzystość formalną; w rozprawie doktorskiej należałoby oczekiwać większej spójności redakcyjnej i jednoznaczności definicyjnej.

Wnioski końcowe

Rozprawa podejmuje rzeczywisty problem metrologiczny związany z interpretacją lokalnych pomiarów przewodnictwa cieplnego i elektrycznego w cienkich warstwach za pomocą metod SthM i 4PP oraz proponuje jego rozwiązanie poprzez zastosowanie modeli uczenia maszynowego wykorzystujących m.in. deskrytory topografii, konfiguracji geometrycznej układu pomiarowego i sygnału pomiarowego. Autor poprawnie implementuje i analizuje modele regresyjne na danych eksperymentalnych, wykazując możliwość redukcji rozbieżności między wartościami mierzonymi a

referencyjnymi w obrębie badanego zbioru. Praca ma charakter aplikacyjny i mieści się w aktualnym nurcie badań nad wykorzystaniem metod ML w inżynierii materiałowej. Uzyskane rezultaty wskazują na możliwość poprawy zgodności numerycznej z wartościami referencyjnymi w obrębie analizowanego zbioru danych.

Jednocześnie należy podkreślić, że zakres potwierdzenia hipotez, w szczególności w odniesieniu do międzymateriałowej predykcyjności modeli ML, nie został w sposób jednoznaczny udokumentowany i wymaga doprecyzowania podczas obrony.

Mimo wskazanych ograniczeń uznaję, że rozprawa stanowi oryginalne zastosowanie metod uczenia maszynowego do rozwiązania problemu metrologicznego istotnego dla inżynierii materiałowej i spełnia w stopniu wystarczającym wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz.U. z 2024 r., poz. 1571). W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Kraków, dnia 23.02.2026

Prof. Krzysztof T. Wojciechowski

/podpis odręczny/

Dodatek do recenzji

Wykaz wybranych uchybień redakcyjnych

1. W pracy zastosowano porządkowanie pozycji bibliograficznych według kolejności pierwszego pojawienia się w tekście (standard Vancouver). Niestety, zasada ta nie została w pełni konsekwentnie zachowana. Przykładowo, już w rozdziale 1 pojawiają się odwołania do pozycji o wyższych numerach (np. [27], [50]) w części wprowadzającej, podczas gdy niektóre publikacje o niższych numerach są przywoływane dopiero w dalszej części pracy. Analogiczne sytuacje występują również w innych fragmentach rozprawy.

II. Spójność oznaczeń wielkości fizycznych

1. Przewodnictwo cieplne (κ)

- s. 7–8 – Skrót *TC* używany bez jednoznacznego przypisania symbolu κ przy pierwszym wprowadzeniu pojęcia.
- s. 29, 52 – W tabelach stosowany zapis „Actual κ ” oraz „Predicted κ ” bez konsekwentnej notacji indeksowej (np. κ_{actual} , κ_{pred}).
- s. 48 (rozdz. 6) – Równoległe użycie zapisów typu „ κ_{actual} ” oraz „actual κ ” (niespójność formy).

2. Przewodnictwo elektryczne (σ)

- s. 15–16 – Równoległe użycie określeń *electrical conductivity*, *conductivity* i skrótu *EC* bez jednoznacznego przypisania symbolu σ przy pierwszym użyciu.
- s. 55, 74 – Zapis „ σ_{actual} ” (bez indeksu dolnego i separatora) w tabelach; niespójny względem zapisów „ σ_{FEM} ” i „ σ_{ML} ”.
- s. 59 (równ. 7.1–7.4) – Stosowane zapisy „ σ_{exp} ”, „ σ_{FEM} ”, „ σ_{ML} ” bez konsekwentnego użycia indeksów dolnych; brak ujednoczenia konwencji względem „ σ_{actual} ”.

3. Parametr Γ_i (TC)

- s. 30, 34, 36, 37, 39–41 – Zapis „ Γ_i ” (bez indeksu dolnego).
- s. 77 – Zapis „ Γ_i ” (z poprawnym indeksem dolnym). Niespójność typograficzna tego samego parametru w różnych częściach pracy.

4. Opór cieplny

- s. 13–14 – Występują zapisy „ $R_{\text{th,P}}$ ” oraz „ $R_{\text{th,p}}$ ” (różna kapitalizacja indeksu). Formalnie tworzy to dwa różne symbole.

III. Definicje i jednostki wielkości fizycznych

- s. 8–9 – Brak podania jednostki przy pierwszym wprowadzeniu przewodnictwa cieplnego.
- s. 16 – Symbol σ pojawia się bez formalnej definicji i jednostki przy pierwszym użyciu.
- s. 18 – Parametry transportowe (np. ruchliwość, koncentracja nośników) przywołane bez podania jednostek przy pierwszym zapisie.

IV. Spójność terminologii i nazewnictwa

- s. 26–27 – Równoległe użycie pojęć *prediction*, *estimation*, *correction* bez formalnego rozróżnienia znaczeniowego.
- s. 48–61 – W części wynikowej używane naprzemiennie określenia *experimental*, *apparent*, *corrected*, *actual conductivity* bez jednoznacznej systematyki symboli.

- s. 63–64 – W rozdziale 9 użycie terminu „predictive model” bez jednoznacznego doprecyzowania, czy chodzi o predykcję międzypróbkową czy estymację w obrębie zbioru danych.
-

V. Oznaczenia zbiorów danych i walidacji (ML)

- s. 46–50 (TC) – Brak jednoznacznego oznaczenia, które wyniki dotyczą zbioru treningowego, a które testowego.
 - s. 56–62 (EC) – Brak jednoznacznej informacji o liczbie niezależnych próbek materiałowych reprezentowanych w analizie; podana liczba rekordów danych nie jest powiązana z liczbą materiałów.
-

VII. Prezentacja wyników w tabelach i na rysunkach

- s. 47–48, 58–60 – W niektórych wykresach brak jednoznacznego podania jednostek przy osiach (konieczność weryfikacji przy każdym rysunku).
- s. 55 – Jednostka parametru Θ w tabeli zapisana w formacie nietypowym („S-mV”), bez wyjaśnienia wymiaru w tekście.
- Tabele 5.1 i 6.4 są w znacznej mierze powtórzone