Imię i nazwisko recenzenta:
...dr hab. inż. Jan Jezierski, Prof. PŚ
Dane adresowe:
44-100 Gliwice
Ul. Szafirowa 47/12
……..

…Gliwice, 11.01.2026….
(data i miejsce)

Recenzja pracy doktorskiej

...mgr inż. Aleksandra Maria Pierwoła...
(imię i nazwisko doktoranta / doktorantki)

pod tytułem: „Modelowanie numeryczne procesu krystalizacji podczas nieizotermicznego wygrzewania oraz analiza korozji amorficznego stopu $Mg_{72}Zn_{27}Pt_1$ o potencjalnym przeznaczeniu biomedycznym":

dr hab. inż. Janusz Lelito, Prof. AGH
(imię i nazwisko promotora)

Prof. Dr.-Ing. Michał Szucki
(imię i nazwisko promotora / promotora pomocniczego)

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

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

2.1. Wprowadzenie i krótka charakterystyka ważności tematu rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Marii Pierwoły dotyczy aktualnej i istotnej problematyki z pogranicza inżynierii materiałowej, biomateriałów oraz modelowania numerycznego procesów fizykochemicznych. Przedmiotem badań jest amorficzny stop

magnezu $Mg_{72}Zn_{27}Pt_1$ (at.%), rozważany jako potencjalny materiał biodegradowalny do zastosowań biomedycznych. Autorka koncentruje się na dwóch zasadniczych aspektach ograniczających praktyczne wykorzystanie stopów Mg:

- stabilności termicznej i skłonności do krystalizacji,

- zachowaniu korozyjnym w środowisku symulującym warunki fizjologiczne.

Istotnym walorem rozprawy jest równoległe potraktowanie badań eksperymentalnych oraz modelowania numerycznego. Autorka nie ogranicza się do jakościowego opisu zjawisk, lecz podejmuje próbę ich ilościowej analizy i prognozowania, co znacząco podnosi wartość poznawczą i aplikacyjną pracy.

Rozprawa ma logiczną i przejrzystą strukturę. Po wprowadzeniu i przeglądzie literatury następuje precyzyjne sformułowanie celów i tez badawczych, opis metodyki, prezentacja wyników eksperymentalnych oraz dwa rozdziały poświęcone modelowaniu numerycznemu: krystalizacji i korozji galwanicznej. Układ pracy umożliwia jednoznaczne śledzenie toku rozumowania Autorki i weryfikację postawionych tez.

Wybór tematu rozprawy należy ocenić bardzo wysoko. Biomateriały biodegradowalne, w szczególności oparte na magnezie, stanowią jeden z najintensywniej rozwijanych kierunków badań w inżynierii biomedycznej. Ich potencjalną przewagą nad implantami trwałymi jest możliwość eliminacji zabiegów reoperacyjnych oraz lepsze dopasowanie procesu degradacji do przebiegu regeneracji tkanek.

Jednocześnie stopy Mg charakteryzują się zbyt szybkim i często niekontrolowanym roztwarzaniem w środowisku fizjologicznym. Autorka trafnie wskazuje, że zastosowanie struktury amorficznej może ograniczać intensywność korozji poprzez eliminację granic ziaren i mikroogniw galwanicznych.

Szczególnie cennym elementem rozprawy jest uwzględnienie korozji galwanicznej pomiędzy fazą amorficzną i krystaliczną, co odpowiada realistycznym scenariuszom częściowej krystalizacji materiału w trakcie obróbki cieplnej, sterylizacji lub eksploatacji. Takie podejście wykracza poza schematyczne porównania „amorficzny vs. krystaliczny" i świadczy o dojrzałości naukowej Autorki.

2.2. Dobór i wykorzystanie źródeł literaturowych

Przegląd literatury został opracowany rzetelnie i z dużą świadomością problemu badawczego. Autorka omawia:

- podstawy struktury i właściwości szkieł metalicznych,

- kryteria zdolności do zeszklenia,

- mechanizmy i modele krystalizacji (w tym podejście KJMAE, metody izokinetyczne, model Matusity–Sakki),

- podstawy elektrochemii korozji i interpretację pomiarów EIS.

Bibliografia obejmuje 132 pozycje, w tym pewną liczbę prac z ostatnich lat tj. 25/132. Biorąc jednak pod uwagę aktualność tematyki spodziewałbym się jeszcze większego udziału najnowszych pozycji literatury. Widoczna jest umiejętność krytycznego doboru źródeł – literatura służy uzasadnieniu przyjętej metodyki i interpretacji wyników, a nie jedynie formalnemu przeglądowi.

Rozdziały literaturowe stanowią solidne zaplecze teoretyczne dla dalszych analiz i potwierdzają bardzo dobrą orientację Doktorantki w aktualnym stanie wiedzy.

2.3. Tezy badawcze i cele badawcze

Cele pracy sformułowano jasno i jednoznacznie. Obejmują one:

- analizę mechanizmu krystalizacji stopu $Mg_{72}Zn_{27}Pt_1$ podczas nieizotermicznego wygrzewania,

- opracowanie modelu kinetycznego tego procesu,

- analizę mechanizmu korozji stopu amorficznego i krystalicznego w roztworze Hanka,

- opracowanie modelu korozji galwanicznej układu amorficzny/krystaliczny.

Tezy badawcze są logicznie powiązane z celami, precyzyjne i weryfikowalne. Ich liczba i zakres są adekwatne do pracy doktorskiej, a sposób ich sprawdzania został konsekwentnie zrealizowany w dalszej części rozprawy. Co warte jest podkreślenia, a nie zawsze widoczne w pracach doktorskich, we wnioskach końcowych Autorka wyraźnie zaznaczyła, które wnioski wskazują na potwierdzenie kolejnych (wszystkich) tez pracy.

2.4. Plan badań i zastosowana metodyka badań

Metodyka badań została zaplanowana w sposób przemyślany i adekwatny do postawionych celów. Autorka zastosowała:

- topienie indukcyjne i szybkie chłodzenie metodą melt-spinning,

- badania strukturalne (XRD, FE-SEM/EDS),

- analizę DSC przy różnych szybkościach nagrzewania,

- badania elektrochemiczne (OCP, krzywe polaryzacyjne, EIS, ZRA),

- obserwacje powierzchni po korozji.

Część modelowa obejmuje:

- autorski model wzrostu ziaren w domenie amorficznej (implementacja w języku programowania C++),

- model korozji galwanicznej wykonany metodą elementów skończonych w środowisku COMSOL.

Zastosowane metody są nowoczesne, wzajemnie się uzupełniają i pozwalają na spójną interpretację wyników i w pełni potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę.

2.5. Dyskusja wyników

Autorka wykazała, że krystalizacja stopu $Mg_{72}Zn_{27}Pt_1$ ma charakter dyfuzyjnie kontrolowany, z heterogenicznym zarodkowaniem i wzrostem preferencyjnie jedno- lub dwuwymiarowym. Analiza DSC, wsparta metodami izokinetycznymi, pozwoliła na wyznaczenie zmiennych parametrów kinetycznych, co świadczy o dojrzałym podejściu do interpretacji danych.

Wyniki badań korozyjnych jednoznacznie potwierdzają wyższą odporność stanu amorficznego w porównaniu z krystalicznym. Autorka wykazała istotne różnice potencjału korozyjnego, oporu polaryzacyjnego oraz gęstości prądu korozyjnego, co zostało spójnie powiązane z obserwacjami morfologii powierzchni.

Szczególnie wartościowa jest analiza korozji galwanicznej, która pokazuje selektywną degradację fazy krystalicznej przy względnej stabilności fazy amorficznej.

Modele numeryczne dobrze odwzorowują obserwowane zjawiska, zarówno jakościowo, jak i ilościowo, co potwierdza poprawność przyjętych założeń.

2.6. Poprawność językowa oraz jakość tabel, wykresów oraz grafiki

Rozprawa napisana jest poprawnym językiem naukowym. Układ pracy jest logiczny, a rysunki i tabele w większości czytelne. Uwagi redakcyjne, które umieściłem w opcji komentarzy w roboczym pliku, mają charakter drugorzędny, porządkujący głównie edytorskie i nieliczne językowe błędy, które obecne są w każdej pracy i nie wpływają na ocenę merytoryczną pracy. Łącznie sformułowałem kilkadziesiąt takich komentarzy, a poniżej zamieściłem tylko kilka najważniejszych:

- w kilku przypadkach Autorka błędnie używa „ilość" zamiast „liczba" dla rzeczowników policzalnych, jak: zarodek, ziarno, kryształ;

- kilkanaście błędów są to tzw. literówki: brakujące litery, powtórzone słowa, niewłaściwa końcówka itp.;

- nazwy metod badawczych w języku polskim niekonsekwentnie zapisywane są z pierwszą dużą literą pierwszego członu a w innych miejscach z dużą literą dla każdego członu itp.;

- jakość kilku rysunków mogłaby być wyższa, dotyczy to głównie rysunków: 12, 13 i 18;

- w kliku miejscach błędnie zapisane zostało nazwisko Nyquist (jest: Nyqist);

- w kliku miejscach użyto niepoprawnych merytorycznie, żargonowych lub też po prostu niefortunnych zwrotów np.: „temperatura topienia" (zamiast topnienia), „materiał staje się sztywny", „wielkość pierwiastków" (gdy chodziło chyba o ich stężenie w stopie), „chłodzenia

z otoczenia", „przesadny wzrost kryształu", „wykonanie pierwszej pochodnej", „na każdej iteracji" i in.

- w kilku miejscach Autorka użyła liczby mnogiej słów, które moim zdaniem nie powinny być tak używane np. energie, ciepła i in.

2.7. Uwagi krytyczne i do dyskusji

Jak to zwykle bywa, Autorka nie ustrzegła się błędów i niedociągnięć, które jednak nie obniżają, jednoznacznie bardzo dobrej merytorycznej oceny rozprawy. Najważniejsze z nich przytoczyłem poniżej, a na uwagi napisane czcionką pogrubioną oczekuję pisemnej odpowiedzi Autorki:

- str. 9: Dlaczego przyjęto udział platyny na poziomie 1% at.? W pewnych miejscach pracy są sugestie, które mogą to wyjaśniać, ale proszę o precyzyjne wyjaśnienie, czy był to wynik analizy literatury, wcześniejszych doświadczeń Autorki, badań wstępnych itp.

- str. 29, podpis rys. 11: Warto by było dodać jakiego typu komórki, ponieważ taki podpis sugeruje, że każda elementarna komórka w sieci krystalicznej wygląda tak samo.

- str. 38: W opisie temperatur likwidus i solidus należałoby uściślić, czy mówimy o podwyższaniu, czy obniżaniu temperatury, bo wówczas wyjaśnienia byłyby inne.

- str. 57: „Pewna ilość stopu krystalicznego została ponownie przetopiona indukcyjnie w kwarcowym tyglu w atmosferze argonu" - Warto byłoby to jednak zapisać dokładnie. "Pewna ilość" - co to znaczy? Szkoda, że także wyżej w pracy nie zapisano, jaka była łączna masa wsadu na jeden wytop.

- str. 57: oznaczenia „wg." - Chodzi oczywiście o stężenie masowe (wagowe) ale moim zdaniem taki zapis jest niefortunny. Może raczej: wag. lub wt. jak w języku angielskim.

- str. 58: w dwóch miejscach: „wybrane próbki amorficzne" – proszę o wyjaśnienie procedury wyboru tych próbek.

- str. 59: „w uproszczony sposób" - Może nie trzeba było pisać takich słów? Wiadomo, że roztwór ten jest uznany za symulujący warunki w ciele człowieka. Taki zapis jak teraz w pracy wprowadza niepotrzebne wątpliwości odnośnie do zakresu tego "uproszczenia".

- str. 59, podpis pod rys. 34: Skoro elektrodą jest płytka to lepiej byłoby strzałkę wskazującą doprowadzić do niej zamiast do podłączenia elektrody, jak na rysunku.

- str. 87: Dlaczego przyjęto taką wielkość początkowego promienia zarodków tj. 1nm?

- str. 89: Czy i na ile te uproszczenia (pierwszy akapit strony) zmniejszają wiarygodność modelu i analiz numerycznych?

- str. 91: Szkoda, że nie opisano choć krótko autorskiego programu, napisanego w języku C++, jego działania itd. Proszę o taki krótki opis, ponieważ wykazanie się

umiejętnością tworzenia tego typu narzędzi, potwierdza bardzo dobry warsztat metodyczny Autorki.

- str. 100, tabela 16: Wynika to wprawdzie z rysunku 58, ale w tabeli warto jednak było dodać, że jednostką długości jest mm.

3. **Wniosek końcowy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Marii Pierwoły spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, ponieważ:

- potwierdza bardzo dobrą wiedzę teoretyczną Autorki,
- dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych,
- zawiera oryginalne elementy modelowania i interpretacji zjawisk.

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 w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

.....
(podpis recenzenta)