

Dr hab. inż. Sebastian Molin, prof. PG
Katedra Inżynierii Materiałów Funkcjonalnych
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 13-10-2025

Recenzja pracy doktorskiej

Autor rozprawy: mgr. inż. Agata Zaborowska

Tytuł rozprawy: **“Badanie wpływu defektowania radiacyjnego i wysokiej temperatury na właściwości amorficznych powłok tlenku glinu do zastosowań w koszulkach paliwowych reaktora typu LFR”**

Wstęp

Niniejsza recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej. Celem dokumentu jest weryfikacja przedstawionej rozprawy doktorskiej pod kątem jej oryginalności, wartości poznawczej i poprawności metodologicznej. Ocena ta ma kluczowe znaczenie w procedurze nadania stopnia doktora i musi potwierdzać, że praca spełnia wymogi merytoryczne określone w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z dnia 20 lipca 2018 r.).

Rozprawa doktorska została wykonana w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w Świerku we współpracy z Politechniką Warszawską, w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa. Opiekę naukową nad pracą sprawowali Promotor Dr hab. inż. Łukasz Kurpaska, prof. NCBJ oraz Promotor Pomocniczy Dr inż. Magdalena Gawęda.

Praca dotyczy wysoce zaawansowanego problemu materiałowego na styku inżynierii jądrowej i inżynierii materiałowej, koncentrując się na stabilności materiałów w ekstremalnych warunkach ekspozycji. W dalszych sekcjach recenzji skupię się na ocenie trzech głównych aspektów: *oryginalności rozwiązania naukowego, poziomu wiedzy teoretycznej Autorki oraz jej umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.*

Tematyka badawcza oraz jej aktualność

Tematyka pracy jest niezwykle aktualna i ma strategiczne znaczenie dla rozwoju nowoczesnej energetyki jądrowej, w szczególności reaktorów IV generacji, zwłaszcza prędkich reaktorów chłodzonych ciekłym ołowiem (LFR – Lead-cooled Fast Reactor). Technologia ta jest jedną z najbardziej perspektywicznych koncepcji w obszarze niskoemisyjnych źródeł energii, a jej rozwój wymaga opracowania nowej klasy materiałów konstrukcyjnych, zdolnych do długotrwałej pracy w środowisku ekstremalnym – przy wysokich temperaturach (500–800 °C), w kontakcie z ciekłym metalem oraz pod wpływem intensywnego strumienia promieniowania jonizującego.

Jednym z głównych problemów technologii LFR jest silna korozyjność ciekłego ołowiu oraz eutektyki Pb–Bi, która prowadzi do degradacji klasycznych stali ferrytycznych i austenitycznych. Tradycyjne podejścia ochronne (np. dodatki stopowe Cr, Al lub Si) okazują się niewystarczające w warunkach dynamicznych przepływów chłodziwa i długiej ekspozycji. Dlatego coraz większe znaczenie zyskują powłoki ochronne typu „barrier coatings”, tworzące warstwę separującą pomiędzy metalem podłoża a ciekłym ołowiem.

W tym kontekście cienkie warstwy tlenku glinu (Al_2O_3) osadzone metodą impulsowego osadzania laserowego (PLD – Pulsed Laser Deposition) stanowią jedno z najbardziej obiecujących rozwiązań. Materiał ten, dzięki wysokiej stabilności chemicznej, odporności na utlenianie i niskiemu współczynnikowi dyfuzji jonów metali, może skutecznie ograniczać kontakt ołowiu z podłożem i przeciwdziałać jego erozji. Jednocześnie amorficzna struktura takich warstw umożliwia lepsze rozpraszanie defektów radiacyjnych niż struktury krystaliczne, co potencjalnie zwiększa ich trwałość w środowisku reaktora.

Rozprawa mgr inż. Agaty Zaborowskiej doskonale wpisuje się w nurt badań pionierskich łączących inżynierię materiałową, fizykę ciała stałego i inżynierię jądrową, koncentrując się na kluczowym aspekcie – stabilności strukturalnej, mechanicznej i radiacyjnej cienkich powłok Al_2O_3 w warunkach odpowiadających eksploatacji reaktora LFR. Praca obejmuje zatem zagadnienia zarówno poznawcze (mechanizmy defektowania, rekombinacji i relaksacji w amorficznym Al_2O_3), jak i praktyczne (ocena trwałości i integralności powłok w warunkach temperaturowych i radiacyjnych).

Wysoka aktualność podjętej tematyki wynika również z powiązania pracy z europejskimi projektami badawczymi, takimi jak GEMMA (Horizon 2020) czy inne inicjatywy dotyczące materiałów dla reaktorów IV generacji. Odpowiada ona także na potrzeby krajowych programów badań jądrowych oraz globalnych strategii bezpieczeństwa energetycznego.

Tak szerokie i przemyślane podejście – łączące badania podstawowe z wymaganiami aplikacyjnymi i osadzające problem w kontekście międzynarodowych trendów – świadczy o dojrzałości naukowej Autorki i umiejętności prowadzenia badań o rzeczywistym znaczeniu dla współczesnej inżynierii materiałowej.

Charakterystyka rozprawy i opis rozdziałów

Rozprawa doktorska mgr inż. Agaty Zaborowskiej liczy łącznie 145 ponumerowanych stron i została przygotowana jako praca oparta na cyklu czterech publikacji naukowych (Załączniki 1–4). Właściwą część pracy poprzedzono obszernym wstępem, przeglądem literatury, opisem celów i metodyki oraz końcową syntezą wyników i wniosków. Układ rozprawy jest logiczny, przejrzysty i w pełni zgodny z dobrymi praktykami obowiązującymi w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Rozdział 1 – Wstęp

Rozdział otwierający wprowadza czytelnika w problematykę materiałów dla reaktorów IV generacji, koncentrując się na reaktorach chłodzonych ołowiem (LFR). Autorka w zwięzły i kompetentny sposób przedstawia kluczowe wyzwania technologiczne, w tym degradację materiałów konstrukcyjnych w środowisku ciekłego ołowiu, konieczność opracowania powłok ochronnych oraz znaczenie badań radiacyjnych dla ich trwałości. Wprowadzenie dobrze porządkuje problem badawczy i precyzyjnie osadza temat pracy w kontekście współczesnych trendów rozwoju energetyki jądrowej.

Rozdział 2 – Wprowadzenie

Drugi rozdział stanowi rozbudowany i bardzo rzetelny przegląd literatury oraz ogólnie stanu wiedzy. Doktorantka omawia w nim kolejno:

- rozwój technologii reaktorów IV generacji,
- charakterystykę i zasadę działania reaktorów typu LFR,
- problemy materiałowe związane z korozją w ciekłym ołowiu,
- wpływ promieniowania jonizującego na strukturę i właściwości materiałów,
- rolę cienkich powłok ochronnych jako barier dyfuzyjnych i antykorozyjnych.

Szczególnie wartościowe jest odniesienie do wyników prac europejskich (projekt GEMMA), co świadczy o doskonałej orientacji Autorki w międzynarodowym kontekście badań. Przegląd został przygotowany w sposób krytyczny – zidentyfikowano istniejące luki badawcze, które stanowią uzasadnienie dla sformułowanej hipotezy i podjęcia badań własnych.

Rozdział 3 – Metodologia badań

W rozdziale trzecim przedstawiono pobieżnie wybrane zagadnienia związane z wykonaniem części eksperymentalnej, m.in. opisano proces wytwarzania cienkich powłok Al_2O_3 metodą impulsowego osadzania laserowego (PLD), defektowania wiązką jonów oraz nanoindentacji.

Rozdział 4 – Uzasadnienie wyboru tematu, hipoteza, cel i zakres pracy

W tym rozdziale doktorantka klarownie formułuje hipotezę oraz cele badawcze. Przedstawione uzasadnienie wyboru tematu zostało osadzone w kontekście projektów europejskich i aktualnych wyzwań technologicznych. Zakres badań został określony w sposób logiczny i spójny – od syntezy powłok przez zagranicznych partnerów, przez ich defektowanie, po analizę strukturalną i mechaniczną. Rozdział ten cechuje się dużą przejrzystością, a jego struktura ułatwia czytelnikowi zrozumienie założeń pracy i kierunku dalszych badań.

Rozdział 5 – Podstawa merytoryczna pracy – cykl publikacji naukowych

Trzon pracy stanowi zestaw czterech publikacji, z których każda rozwija inny aspekt zagadnienia:

- Publikacja 1: dotyczy wpływu defektowania jonowego o niewielkiej energii (do 50 dpa co symuluje praktycznie cały „cykl życia” powłoki w środowisku reaktora jądrowego IV Generacji) i pokazuje, że nawet przy tak wysokiej dawce uszkodzeń, amorficzne powłoki Al_2O_3 zachowują spójność strukturalną i wysoką twardość;
- Publikacja 2: opisuje defektowanie jonami Au^+ o energii 1,2 MeV (do 25 dpa) i wykazuje zachowanie amorficzności warstw po napromieniowaniu oraz jedynie niewielkie zmiany mechaniczne;
- Publikacja 3: analizuje stabilność strukturalną i ewolucję właściwości mechanicznych podczas wygrzewania w zakresie 600–900 °C, identyfikując temperaturę krystalizacji około 850 °C;
- Publikacja 4: podsumowuje wyniki poprzez badania w docelowym zakresie temperatur pracy, gdzie zastosowano metodę nanoindentacji oraz dyfrakcji rentgenowskiej a testy prowadzono bezpośrednio w wysokich temperaturach.

Każda z publikacji została właściwie powiązana z celami pracy i tworzy spójną całość, a ich układ logicznie prowadzi od obserwacji mikrostrukturalnych do wniosków aplikacyjnych.

Niemniej jednak, w części opisowej tego rozdziału **brakuje jednoznacznego określenia indywidualnego wkładu Doktorantki** w poszczególne publikacje. Każda z prac obejmuje liczne współautorstwo (od 8 do 13 autorów), co utrudnia jednoznaczną ocenę jej samodzielnego udziału w planowaniu i realizacji badań.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami i dobrymi praktykami oceny rozpraw opartych na cyklu publikacji, jasne wskazanie zakresu zadań wykonywanych samodzielnie przez Doktorantkę – zarówno w części eksperymentalnej, jak i interpretacyjnej – jest niezbędne dla właściwej oceny spełnienia wymagań ustawowych dotyczących samodzielności badań.

Brak takiej informacji uważam za najistotniejszy mankament przedstawionej rozprawy. Dlatego też proszę o szczegółowe przedstawienie wkładu indywidualnego Doktorantki w poszczególne prace podczas publicznej obrony rozprawy.

Rozdział 6 – Podsumowanie i wnioski

Rozdział ten integruje wyniki wszystkich czterech publikacji, tworząc syntetyczny obraz zachowania amorficznego Al_2O_3 w warunkach reaktora typu LFR. Autorka w sposób dojrzały interpretuje dane, wskazując mechanizmy stabilizacji struktury amorficznej, procesy relaksacji i lokalne reorganizacje sieci atomowej. Analizy TEM i RDF potwierdzają brak krystalizacji nawet przy wysokich dawkach promieniowania. Wyniki nanomechaniczne, przedstawione w funkcji temperatury, pokazują niewielki spadek twardości przy zachowaniu sprężystości i braku degradacji warstwy. Dyskusja wyników jest prawidłowa i odnosi się do stanu wiedzy, obejmując odniesienia do literatury światowej.

Rozdział 7 – Perspektywy dalszej pracy

Rozdział ten stanowi dobrze przemyślane podsumowanie kierunków rozwoju pracy. Autorka wskazuje możliwe ścieżki kontynuacji badań, m.in. wpływ długotrwałych ekspozycji w ciekłym ołowiu, rozszerzenie zakresu temperatur oraz modyfikację składu chemicznego powłok (np. domieszkowanie Y, Zr lub Si). Wskazanie tych kierunków świadczy o pełnym zrozumieniu złożoności problemu i jego praktycznego znaczenia dla projektowania materiałów dla energetyki jądrowej.

Całość rozprawy cechuje się spójnością, dojrzałością analizy oraz umiejętnym łączeniem badań podstawowych i aplikacyjnych. Każdy rozdział logicznie wynika z poprzedniego, a konstrukcja pracy sprzyja przejrzystości przekazu i pełnemu zrozumieniu tematu przez czytelnika.

Cel i hipoteza badań

Cel badawczy rozprawy został sformułowany w sposób jednoznaczny i logiczny. Praca dotyczy eksperymentalnej oceny wpływu wysokiej temperatury oraz defektowania radiacyjnego na strukturę, właściwości mechaniczne i stabilność amorficznych powłok tlenku glinu (Al_2O_3), wytwarzanych metodą impulsowego osadzania laserowego (PLD).

Podstawowym celem było określenie, czy cienkie, amorficzne warstwy Al_2O_3 mogą skutecznie pełnić funkcję barier ochronnych w koszulkach paliwowych reaktorów typu LFR, zachowując stabilność w warunkach wysokich temperatur oraz ekspozycji na promieniowanie jonizujące.

Cel szczegółowy pracy obejmował zbadanie wpływu czynników środowiskowych na właściwości mechaniczne oraz strukturalne powłok co pozwoli na ocenę potencjalnej trwałości i przydatności opracowanych powłok w warunkach zbliżonych do eksploatacji w środowisku ciekłego ołowiu.

Hipoteza badawcza została przedstawiona w sposób poprawny, chociaż nieco ogólny. Zakłada ona, że amorficzne powłoki Al_2O_3 dzięki swojej nieuporządkowanej strukturze wykazują podwyższoną odporność na defektowanie radiacyjne i wysoką temperaturę, co pozwala im zachować integralność strukturalną i funkcjonalną w warunkach eksploatacyjnych reaktora LFR. Hipoteza ta jest spójna z aktualnym stanem wiedzy i logicznie wynika z przeglądu literatury, a jej weryfikacja stanowi główną oś badawczą pracy.

Poziom wiedzy teoretycznej i analiza bibliografii

Doktorantka wykazała się szeroką wiedzą teoretyczną z dziedziny materiałów tlenkowych, inżynierii jądrowej oraz zaawansowanych technik charakteryzacji materiałów, co zostało przedstawione w Rozdziale 2.

Analiza bibliografii: Praca została oparta na bazie bibliograficznej liczącej 118 pozycji. Literatura jest aktualna i adekwatna do postawionego problemu badawczego. Analiza dat publikacji wskazuje, że znacząca część cytowanych prac pochodzi z ostatnich ~15 lat, przy czym widoczny jest wysoki odsetek artykułów z lat 2020-2025, co świadczy o bieżącym śledzeniu najbardziej aktualnych osiągnięć w dziedzinie. Doktorantka trafnie odwołuje się zarówno do fundamentalnych prac dotyczących mechaniki materiałów amorficznych, jak i do najnowszych badań dotyczących stabilności radiacyjnej i termicznej tlenku glinu i innych materiałów dla reaktorów LFR.

Autorka posiada odpowiednią wiedzę na temat zaawansowanych technik eksperymentalnych. Opis metod, w szczególności metodyki defektowania jonowego oraz procedur nanoindentacji i badań TEM *in-situ*, jest wystarczający do zrozumienia całości pracy. Świadczy to o opanowaniu warsztatu naukowego i zdolności do samodzielnego projektowania, przeprowadzania i interpretowania skomplikowanych pomiarów.

Metodyka badań

Metodyka badań została opracowana z dużą starannością i odznacza się wysokim poziomem zaawansowania technologicznego. Obejmuje zarówno etap przygotowania próbek, ich kontrolowanego defektowania, jak i kompleksową charakteryzację strukturalną oraz mechaniczną.

1. Synteza powłok:

Wytwarzanie powłok Al_2O_3 realizowano metodą impulsowego osadzania laserowego (PLD), pozwalającą na precyzyjną kontrolę grubości, morfologii i składu chemicznego cienkich warstw. Zastosowanie tej techniki umożliwiło uzyskanie jednorodnych, amorficznych filmów o bardzo dobrej adhezji do podłoża stalowego. Proces prowadzono w ściśle kontrolowanych warunkach próżniowych, co zapewniło wysoką czystość materiału i powtarzalność wyników. Za przygotowanie powłok odpowiedzialni byli partnerzy z IIT we Włoszech, co zostało wyraźnie zaznaczone w pracy.

2. Symulacja defektowania radiacyjnego:

W celu odwzorowania efektów promieniowania reaktorowego zastosowano m.in. napromieniowanie wiązką ciężkich jonów złota (Au^+) o energii 1,2 MeV, w zakresie dawek do 50 dpa (*displacements per atom*). Technika ta stanowi uznane narzędzie badań materiałów narażonych na promieniowanie i umożliwia przyspieszone odwzorowanie procesów uszkodzania sieci krystalicznej. Parametry ekspozycji zostały dobrane tak, aby uzyskać realistyczny poziom defektowania i kontrolowany rozkład uszkodzeń w funkcji głębokości.

3. Charakteryzacja strukturalna i mechaniczna:

Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością nowoczesnych technik analitycznych, w tym metod pomiarowych in-situ.

- Nanoindentacja w podwyższonych temperaturach – umożliwiła ilościowe określenie twardości i modułu Younga w funkcji temperatury i wpływu stopnia defektowania na ww. właściwości mechaniczne, a także analizę relaksacji naprężeń w warstwach amorficznych.
- Badania strukturalne in-situ (TEM, SAED, XRD, GIXRD, RDF) – pozwoliły na śledzenie w czasie rzeczywistym zmian fazowych, procesów krystalizacji, rekombinacji defektów oraz lokalnych przeorganizowań atomowych w strukturze amorficznej.
- Dodatkowe techniki (SEM, AFM, XPS, RBS, FTIR) dostarczyły informacji o topografii powierzchni, składzie chemicznym, gęstości i profilu głębokościowym powłok, uzupełniając obraz złożonych zjawisk zachodzących podczas napromieniowania i wygrzewania.

Uważam, że ten rozdział powinien być znacznie bardziej rozbudowany i w istniejącej formie niestety nie dostarcza dostatecznej wiedzy o użytych metodach eksperymentalnych, nawet zważywszy na części eksperymentalne zawarte w publikacjach. Autorka bardzo pobieżnie opisała nieliczne, wybrane metody eksperymentalne.

Oryginalność i znaczenie uzyskanych wyników

Przedstawiony cykl publikacji stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe o wysokiej wartości poznawczej i aplikacyjnej. Uzyskane wyniki mają charakter *pionierski w skali światowej*, zwłaszcza w zakresie kompleksowej analizy stabilności Al_2O_3 pod wpływem połączonych czynników termicznych i radiacyjnych.

Kluczowe oryginalne osiągnięcia:

- Wysoka stabilność radiacyjna w temperaturze pokojowej: Potwierdzono, że amorficzne powłoki wykazują wyjątkowo wysoką tolerancję na defektowanie jonowe w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, co jest krytyczną informacją dla inżynierii materiałowej.
- Określenie granicy stabilności termicznej: Doktorantka zidentyfikowała temperaturę krystalizacji, co stanowi fundamentalną wiedzę o ograniczeniach eksploatacyjnych badanych powłok.
- Identyfikacja mechanizmów deformacji: Wyjaśnienie wzrostu plastyczności wraz z temperaturą, powiązanego z reorganizacją wiązań międzyatomowych, stanowi ciekawą wiedzę w dziedzinie mechaniki materiałów amorficznych.

Uzyskane wnioski mają bezpośrednie znaczenie aplikacyjne, ponieważ stanowią dane wejściowe do dalszego projektowania powłok, wskazując na konieczność ich stabilizacji, np. poprzez domieszkowanie.

Opracowanie redakcyjne

Praca jest dobrze opracowana pod względem merytorycznym, językowym i graficznym. Struktura jest logiczna i spójna, a przedstawienie wyników – metodyczne i szczegółowe. Praca zawiera jedynie kilka błędów tzw. „literówek”. Rysunki są dobrze przedstawione i wykonane, ułatwiając odczyt niezbędnych informacji, chociaż Rysunki 1 i 2 odstają moim zdaniem od pozostałych pod kątem formy graficznej (czarno-białe)

Uwagi/pytania szczegółowe

Ze względu na mnogość zagadnień poruszanych w pracy, proszę o wyjaśnienie/rozszerzenie następujących interesujących mnie kwestii:

- Zastosowanie metody PLD:

W pracy wykorzystano metodę PLD do wytwarzania warstw na płaskich podłożach. Prosiłbym o komentarz, w jaki sposób – zdaniem Autorki – technika ta mogłaby zostać przystosowana do pokrywania wnętrza koszulek paliwowych. Wymagałoby to specyficznej konstrukcji komory lub głowicy PLD – proszę o odniesienie się do tej kwestii.

Ponadto, nie mogę w pełni zgodzić się ze stwierdzeniem Doktorantki, że metoda PLD należy do „stosunkowo prostych metod”. Prosiłbym o doprecyzowanie, w jaki sposób Autorka rozumie to sformułowanie.

- Przygotowanie powierzchni próbek:

W każdej z publikacji stalowe podłoża były szlifowane zgodnie z identyczną procedurą. Czy podobne przygotowanie powierzchni byłoby możliwe w przypadku rur lub koszulek paliwowych? Przygotowanie podłoża ma kluczowy wpływ na adhezję warstw, a także na właściwości strukturalne warstwy przypowierzchniowej. Prosiłbym o komentarz dotyczący doboru metody przygotowania powierzchni w kontekście planowanych zastosowań praktycznych.

- Zgodność współczynników rozszerzalności cieplnej (CTE):

Stal austenityczna 316L charakteryzuje się znacznie wyższym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej niż warstwy Al_2O_3 . Czy istnieją ogólne wytyczne materiałowe lub dopuszczalne granice różnicy współczynników CTE dla tego typu układów warstwa–podłoże, zwłaszcza w kontekście zastosowań wysokotemperaturowych?

- Grubość powłok:

W trzech pierwszych publikacjach analizowano głównie powłoki o grubości ok. 1 μm (w jednej z prac również próbkę o grubości 5 μm), natomiast w ostatniej pracy badano wyłącznie powłokę o grubości 5 μm . Prosiłbym o komentarz dotyczący motywacji wyboru tej większej

grubości w ostatnim etapie badań – czy wynikała ona z założeń eksperymentalnych, wymagań aplikacyjnych, czy może z wcześniejszych obserwacji dotyczących stabilności cieplnej warstw?

- Temperatura pracy badanych powłok:

Reaktory jądrowe, zwłaszcza IV Generacji, pracują w wyższych temperaturach niż klasyczne PWRy. Czy planowane są, lub prowadzone są badania wpływu defektowania radiacyjnego badanych materiałów mimikując temperaturę pracy LFRów? Jak promieniowania i temperatura wpływają na temperaturę krystalizacji?

Ocena spełnienia wymogów ustawowych

Na podstawie szczegółowej analizy przedstawionej pracy doktorskiej stwierdzam, że spełnia ona wszystkie warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, co uzasadniam następująco:

1. Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Doktorantka wykazała się dogłębnym zrozumieniem zagadnień z zakresu fizyki ciała stałego, inżynierii jądrowej oraz zaawansowanych technik badawczych, co znajduje potwierdzenie w wyczerpującym i krytycznym przeglądzie literatury.
2. Praca dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Świadczy o tym samodzielność w planowaniu i realizacji złożonego, interdyscyplinarnego programu badawczego, opracowanie innowacyjnej metodyki in-situ oraz dojrzała i wnikliwa interpretacja uzyskanych wyników.
3. Przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o istotnym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym. Pionierski charakter badań nad stabilnością amorficznych powłok Al_2O_3 w warunkach symulujących pracę reaktora LFR oraz unikalne wyniki dotyczące mechanizmów defektowania i granic stabilności termicznej stanowią nową i wartościową wiedzę w skali międzynarodowej.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa mgr inż. Agaty Zaborowskiej stanowi interdyscyplinarne i oryginalne opracowanie naukowe z zakresu inżynierii materiałowej, o istotnym znaczeniu dla rozwoju technologii reaktorów jądrowych IV Generacji.

W prezentowanych wynikach badań i rozprawie, doktorantka wykazała się:

- Szeroką wiedzą teoretyczną z dziedziny materiałów jądrowych, fizyki promieniowania i zaawansowanej charakteryzacji.
- Samodzielnością w planowaniu i prowadzeniu skomplikowanych i innowacyjnych badań eksperymentalnych.
- Umiejętnością krytycznej analizy i interpretacji wyników, łącząc dane strukturalne i mechaniczne.

Wszystkie cele pracy zostały zrealizowane, a uzyskane wyniki wnoszą nową, kluczową wiedzę do inżynierii materiałowej, zwłaszcza w kontekście ich potencjału aplikacyjnego.

Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa spełnia wszystkie wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz w pełni uzasadnia nadanie mgr inż. Agacie Zaborowskiej stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Agaty Zaborowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz o nadanie jej stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Z uwagi na interdyscyplinarność, złożoność zagadnień oraz bardzo wysoki poziom naukowy rozprawy, i oryginalność uzyskanych wyników - publikacje naukowe o dużej widoczności w środowisku naukowym, ich znaczenie aplikacyjne oraz innowacyjność zastosowanej metodyki *in-situ*, rekomenduję *wyróżnienie rozprawy*.

Z poważaniem,



Sebastian Molin