



**Wojskowa
Akademia
Techniczna**

płk dr hab. inż. Marek Polański, prof. WAT
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego
ul. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

email: marek.polanski@wat.edu.pl

Warszawa, dnia 03 września 2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pt. „Badanie wpływu defektowania radiacyjnego i wysokiej temperatury na właściwości amorficznych powłok tlenku glinu do zastosowań w koszulkach paliwowych reaktora typu LFR”

autorstwa mgr inż. Agaty Zaborowskiej

Podstawa formalna recenzji

Recenzję sporządzono na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej z dnia 27 czerwca 2025.

Dobór tematu i wartość naukowa rozprawy

Wybór tematu przez Autorkę niniejszej rozprawy wynika z aktualnych wyzwań związanych z rozwojem reaktorów jądrowych IV generacji typu LFR (Lead-cooled Fast Reactor). Konstrukcje te wykorzystują ciekły ołów jako chłodziwo, a przez to stwarzają wyjątkowo trudne środowisko pracy dla materiałów konstrukcyjnych, ze względu na jego silnie korozyjne oddziaływanie oraz towarzyszące mu ekstremalne warunki radiacyjne i temperaturowe. Dotychczasowe badania wskazują, że żaden ze znanych konstrukcyjnych stopów metali nie zapewnia satysfakcjonującej odporności w tych warunkach. W związku z tym rośnie znaczenie rozwiązań hybrydowych, w tym powłok ceramicznych. Takie powłoki dzięki chemicznej odporności w różnych środowiskach mogą stanowić skuteczną barierę ochronną dla materiałów bazowych z których wykonane są koszulki paliwowe. Szczególnie obiecującą propozycją są cienkie amorficzne powłoki z tlenku glinu (Al_2O_3) osadzane metodą impulsowego osadzania laserowego (z ang. PLD). Łączą one zalety materiałów ceramicznych i amorficznych, takie jak odporność korozyjna, wysoka adhezja do podłoża oraz, co bardzo ciekawe, plastyczność

– zupełnie nietypowa dla tradycyjnych ceramik. Autorka wybrała temat pracy na skutek zidentyfikowania luki badawczej dotyczącej zachowania amorficznych powłok Al_2O_3 w warunkach kluczowych czynników degradacyjnych, tj. defektowania radiacyjnego oraz temperatury bliskiej tej, w której takie materiały musiałyby pracować w reaktorach. W literaturze przedmiotu brakuje kompleksowych analiz łączących ocenę mechanicznych i strukturalnych właściwości tych materiałów, szczególnie w warunkach symulujących środowisko reaktora typu LFR. Niniejsza rozprawa odpowiada na tę potrzebę poprzez zaprojektowanie i realizację zaawansowanych badań eksperymentalnych.

Wartość naukowa rozprawy jest wysoka z kilku powodów. Po pierwsze, wykazano wysoką odporność amorficznych powłok Al_2O_3 na defektowanie jonowe, które słusznie wybrano do symulacji uszkodzeń wywołanych strumieniem neutronów. Po drugie, określono temperaturę inicjacji procesu krystalizacji, która zachodzi po długotrwałej ekspozycji powłoki na temperaturę około 700 °C. Stanowi to istotny wkład w zrozumienie granic stabilności termicznej tego materiału układzie hybrydowym. Co więcej, uzyskany wynik poddano krytycznej analizie (co uważam za szczególnie cenne), zwracając uwagę na fakt, że pomimo znacznego „zapasu” temperatury pracy względem temperatury w reaktorze, nie można wykluczyć (a nawet uznano za wysoce prawdopodobne) synergiczne działanie obydwu czynników destrukcyjnych. Po trzecie, analiza wskazuje, że zmiany w twardości i module sprężystości mogą być związane z procesami reorganizacji uporządkowania bliskiego zasięgu, co jest charakterystyczne dla materiałów amorficznych. Wyniki te rozszerzają wiedzę na temat zachowania cienkich powłok tlenkowych w warunkach reaktorowych. Wskazują również na konieczność poszukiwania metod dodatkowej stabilizacji struktury, np. poprzez kontrolowane domieszkowanie.

Podsumowując, podjęty temat odpowiada na realne zapotrzebowanie współczesnej energetyki jądrowej. Przedstawiona praca wnosi istotny wkład do nauki, uzupełniając dotychczasowe luki w stanie wiedzy. Rozprawa otwiera perspektywę dalszych badań nad poprawą trwałości amorficznych powłok Al_2O_3 oraz ich potencjalnym wdrożeniem w reaktorach IV generacji.

Wartość merytoryczna rozprawy

Praca powstała w formule cyklu publikacji, co wiąże się z pewnymi ograniczeniami w ocenie indywidualnego wkładu poszczególnych autorów. Autorka w bardzo klarowny i spójny sposób wprowadziła czytelników w tematykę rozprawy. Przekaz jest jasny niemal podręcznikowy, przy czym można powiedzieć, że opis ten nie zawiera zbędnych elementów. Wartość merytoryczna rozprawy wynika z kompleksowego podejścia do zagadnienia oceny stabilności i odporności powłok Al_2O_3 osadzanych metodą PLD oraz pracujących w warunkach odpowiadających środowisku pracy reaktorów IV generacji. Autorka przeprowadziła spójny zestaw badań obejmujący zarówno analizę strukturalną, jak i charakterystykę właściwości mechanicznych, a następnie zestawiała uzyskane wyniki z procesami defektowania radiacyjnego oraz starzenia termicznego. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych metod badawczych, takich jak nanoindentacja, wysokotemperaturowa dyfrakcja rentgenowska czy transmisyjna mikroskopia elektronowa możliwe było zaproponowanie mechanizmów prowadzących do degradacji powłok. Wyniki uzyskane w rozprawie uzupełniają istniejącą wiedzę o zachowaniu amorficznych tlenków w ekstremalnych warunkach wskazując na granice ich stabilności oraz potencjalne kierunki dalszej modyfikacji materiału. W opinii recenzenta praca stanowi istotny wkład

w rozwój materiałów ochronnych dla energetyki jądrowej, łącząc rzetelną analizę eksperymentalną z interpretacją opartą na współczesnym stanie wiedzy.

Poprawność redakcyjna rozprawy

Układ pracy jest typowy dla prac doktorskich przedstawianych w postaci cyklu publikacji. Jeśli przyjąć taką koncepcję rozprawy Autorka bardzo poprawnie wprowadza w temat, opisuje metodyki badawcze, wskazuje hipotezę badawczą, cel pracy i zakres pracy. Rozprawa została przygotowana ze starannością pod względem redakcyjnym. Tekst jest spójny i przejrzysty oraz utrzymany w odpowiednim, naukowym stylu, a układ treści sprzyja czytelności i ułatwia odbiór pracy. Poszczególne rozdziały zostały logicznie powiązane, co pozwala na płynne czytanie i odbiór pracy. Całość świadczy o dbałości autorki zarówno o stronę merytoryczną, jak i językową. Należy jednak zaznaczyć, że w pracy występują nieliczne drobne uchybienia redakcyjne oraz kilka niskiej jakości ilustracji, które nie wpływają na ogólną wartość i wysoką jakość rozprawy.

Uwagi krytyczne i sugestie

W opinii recenzenta głównym i dość poważnym zarzutem do rozprawy jest sama forma w jakiej ją przygotowano. Cztery publikacje, choć naprawdę spójne (i Autorka pełni w nich rolę wiodącą), są jednak wieloautorskie. Powoduje to poważne wątpliwości co do zakresu badań, ale i interpretacji wyników za które Autorka była odpowiedzialna. Dodatkowo, z racji, że praca była realizowana w ramach dużego projektu, można domniemywać, że publikacje kryją w sobie myśli i pracę wielu autorów. Nie do końca satysfakcjonującą (bo mało precyzyjną) podpowiedzią dla recenzenta są zdefiniowane w artykułach role autorów. Trudność w wydzieleniu samodzielnej pracy Autorki stanowi znaczący mankament zaciemniający odbiór i utrudniający ocenę, ale nie jest to wada dyskwalifikująca pracę.

Pomimo wysokiego poziomu rozprawy, należy zwrócić uwagę na kilka omyłek pisarskich i uchybień w opisowej części pracy, a także w artykułach tworzących cykl. Poniżej zostaną one wymienione bez podziału na rodzaje tych uwag, w kolejności niechronologicznej.

- 1) W spisie skrótów (str. 16) a także w tekście (str. 62) napisano „Primarily Knocked-on Atom” (powinno być Primarily albo częściej używane Primary Knock-on Atom)
- 2) W spisie skrótów (str. 16) oraz na stronie 60 napisano „Physical Vapour Depostion” – poprawnie powinno być: „Deposition”.
- 3) Na stronie 40 napisano „Zjawisko pęcznienia zilustrowane na przykładzie koszulki paliowej”, powinno być „paliwowej”.
- 4) Na stronie 62 widnieje słowo „Cześć”, zamiast „część”.
- 5) Na stronie 62 widnieje słowo „neuronów”, zamiast „neutronów”.
- 6) W podpisie rysunku 13 napisano „rektorów atomowych” zamiast „reaktorów atomowych”
- 7) Rysunek 6 w zaproponowanym przez Autorkę rozmiarze jest praktycznie nieczytelny
- 8) Rysunki we wstępnej części są zapożyczone wraz z oryginalnymi angielskimi opisami. Uważam, że w polskojęzycznym opracowaniu powinny być spolszczone.
- 9) Autorka używa sformułowania „struktura bliskiego zasięgu” (str. 53). W inżynierii materiałowej zwykło się rozróżniać poziomy struktur materiału, ale mówi się raczej

- o „uporządkowaniu krótkiego/bliskiego zasięgu”. „Struktura bliskiego zasięgu” to raczej nieco niefortunny skrót myślowy.
- 10) Autorka używa sformułowania „wysokiej temperaturze” (str. 56), co jest określeniem nieprecyzyjnym i niewiele mówi czytelnikowi o warunkach niezbędnych do krystalizacji amorficznej warstwy Al₂O₃.
 - 11) Nie do końca jest dla mnie zrozumiałe wytłuszczanie i podkreślanie „ważnych” słów w tekście. Praktyka ta raczej stosowana jest we wnioskach projektowych i ma na celu zwrócenie uwagi zapracowanych recenzentów na bardziej istotne fakty. W przypadku pracy doktorskiej praktyka ta wydaje się być bezpodstawna.
 - 12) W opisie nanoindentacji jako metodyki badawczej, Autorka pisze o możliwościach wytopu w piecu łukowym w NCBJ. Wydaje się to być bez związku z pracą.
 - 13) Na stronie 69 Autorka pisze: „... późniejszą charakteryzację materiału pod kątem zmian strukturalnych oraz mechanicznych.” Prawdłowo powinno być napisane: „... późniejszą charakteryzację materiału pod kątem zmian strukturalnych oraz właściwości mechanicznych.”
 - 14) Autorka używa słowa charakterystyki (str. 73), podczas gdy należałoby w tym przypadku użyć słowa „scharakteryzowania”.
 - 15) Autorka oznacza refleksy na dyfraktogramie rentgenowskim jako „steel”. Stal to ogólna nazwa grupy stopów, które często są wielofazowe podczas gdy na dyfraktogramie oznaczane są konkretne fazy (np. austenit, ferryt itp.).
 - 16) Autorka ma zwyczaj łączenia punktów pomiarowych liniami łamanymi, co jest niezgodne z zasadami przedstawiania wyników badań.

Ocena końcowa

Pani mgr inż. Agata Zaborowska posiada w swoim dorobku naukowym (stan na dzień 3 września 2025) 12 publikacji indeksowanych w bazie Scopus, cytowanych łącznie 111 razy (83 razy bez autocytowań wszystkich autorów) co przekłada się na indeks H=7 i co jest bardzo dobrym dorobkiem jak na ten etap kariery.

Doktorat autorstwa Pani mgr inż. Agaty Zaborowskiej jest pracą spójną, zwięzłą, przejrzystą i na wysokim poziomie naukowym, złożoną z publikacji w dobrych czasopismach o zasięgu międzynarodowym.

Stwierdzam, że przedłożona do oceny praca spełnia warunki ustawowe i wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr inż. Agaty Zaborowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

