

Kraków 12.09.2025

## OCENA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Agaty Zaborowskiej**

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

opracowana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki  
Warszawskiej nr 89/III/2025 z dnia 27 czerwca 2025 roku

### 1. Charakterystyka ogólna pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska Pani mgr inż. Agaty Zaborowskiej wykonana została pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Łukasza Kurpaski oraz dr inż. Magdaleny Gawędy, która pełniła funkcję promotora pomocniczego. Tematyka recenzowanej pracy dotyczy określenia synergicznego wpływu defektowania radiacyjnego oraz wysokich temperatur na właściwości strukturalne oraz mechaniczne amorficznych powłok  $Al_2O_3$  do ich potencjalnych zastosowań w koszulkach paliwowych reaktorów IV generacji typu LFR. Opracowanie zaawansowanych materiałów osłonowych, zdolnych do pracy w ekstremalnych warunkach (wysoka temperatura, intensywne pole promieniowania, korozyjne środowisko ciekłego ołowiu) jest jednym z kluczowych wyzwań dla rozwoju reaktorów jądrowych IV generacji, w tym reaktorów chłodzonych ołowiem (LFR). Tematyka pracy, skupiająca się na amorficznych powłokach tlenku glinu, jest szczególnie interesująca. Materiały amorficzne, w przeciwieństwie do swoich krystalicznych odpowiedników, często wykazują podwyższoną odporność na uszkodzenia radiacyjne z uwagi na brak dalekozasięgowego uporządkowania i zdolność do rekombinacji defektów punktowych bez zniszczenia globalnej struktury. Autorka podjęła się ambitnego zadania zbadania jednoczesnego wpływu dwóch kluczowych czynników degradacyjnych – temperatury i promieniowania – na właściwości tych powłok.

Zrozumienie wpływu promieniowania jonizującego na materiały jest fundamentem dla ich świadomego projektowania, a także dla wiarygodnego prognozowania ich trwałości w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Kwestia ta staje się niezwykle aktualna w świetle realizowanego Polskiego Programu Energetyki Jądrowej. Jest to jednocześnie zagadnienie badawcze o wysokim stopniu złożoności, podejmowane jedynie przez wiodące ośrodki naukowe na świecie.

W środowisku reaktora jądrowego, gdzie materiały są poddane jednoczesnemu działaniu intensywnego pola promieniowania i podwyższonej temperatury, dochodzi do szeregu zjawisk degradacyjnych. Procesy te, takie jak wzrost wytrzymałości przy jednoczesnej utracie plastyczności w stalach konstrukcyjnych, drastycznie ograniczają żywotność kluczowych komponentów. U ich podstaw leżą mechanizmy mikrostrukturalne: generacja defektów krystalicznych, ich klastrowanie oraz intensyfikacja procesów dyfuzyjnych. Makroskopową manifestacją tych zjawisk jest puchnięcie, formowanie pęcherzy gazowych oraz deformacja elementów pracujących w pobliżu rdzenia.

Precyzyjne modelowanie tych procesów jest niezbędne do oceny realnego czasu pracy komponentów, a także stanowi podstawę do poszukiwania i projektowania innowacyjnych materiałów o podwyższonej odporności. Wyzwanie to jest tym większe, że reaktory nowej generacji (Gen. IV) będą stawiać przed materiałami jeszcze surowsze wymagania, intensyfikując procesy degradacji, które w przeszłości przyczyniły się do spowolnienia rozwoju energetyki jądrowej.

Jako metodę modyfikacji materiałów Doktorantka wybrała ich naświetlanie przy użyciu wiązek jonów, które wpływa podobnie na zmianę właściwości jak promieniowanie neutronowe, lecz jest dużo bardziej od niego wydajne. Pozwala to, w znacznie krótszym czasie, wygenerować ilość uszkodzeń na poziomie odpowiadającym pełnemu cyklowi pracy takiego materiału. Istotne również jest, że metoda nie powoduje aktywacji badanego materiału, jak może to mieć miejsce w przypadku innych rodzajów promieniowania. Natomiast trzeba mieć świadomość, że ze względu na swoją masę i ładunek elektryczny jony są dużo szybciej rozpraszane w materiale, a uszkodzenia mają raczej charakter powierzchniowy.

W prowadzonych badaniach Doktorantka skupiła się na cienkich powłokach amorficznych z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoszonych metodą impulsowego osadzania laserowego PLD na podłożach ze stali austenitycznej 316L. Układy takie rozważała pod kątem ich ewentualnej przydatności jako elementy konstrukcyjnej reaktorów LFR, ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania ich jako koszulki paliwowe.

Recenzowana rozprawa doktorska przygotowana została w formie cyklu 4 publikacji i wydana została przez Politechnikę Warszawską w formie monografii liczącej 145 stron. Składają się na nią: streszczenia w języku polskim i angielskim, spisy rysunków, tabel oraz stosowanych

skrótów i oznaczeń. Główną część pracy stanowi 7 rozdziałów. W rozdziale pierwszym stanowiącym wstęp przedstawiona została ogólnie tematyka prowadzonych badań oraz struktura pracy. Wprowadzenie merytoryczne stanowi rozdział drugi, na który składa się 11 podrozdziałów, w których Doktorantka przedstawia znaczenie energetyki jądrowej jako źródła energii, wyzwania materiałowe przed elementami pracującymi w reaktorach IV generacji, wpływ promieniowania oraz warunki ich pracy. Metodologia wykonanych badań zebrana została w rozdziale 3. Rozdział 4 zawiera uzasadnienie wyboru tematu, hipotezę, cel badawczy i zakres przeprowadzonych badań. Rozdział 5 stanowi skrótowy opis najważniejszych wyników przedstawionych w 4 publikacjach stanowiących cykl, zamieszczonych jako osobne załączniki (1-4) na końcu pracy. Dwa ostatnie rozdziały stanowią podsumowania i wnioski oraz perspektywy dalszej pracy. Po części głównej monografii zamieszczona została lista konferencji i publikacji oraz stosowna bibliografia. Rozprawa ma klarowną strukturę, składającą się z obszernego wprowadzenia, części stanowiącej najważniejsze wnioski, przedruku opublikowanych artykułów oraz podsumowania wraz z planami naukowymi na przyszłość.

## **2. Struktura i zawartość merytoryczna rozprawy**

### *2.1. Część wstępna (Wprowadzenie)*

Zasadniczą część literaturową pracy rozpoczyna rozdział 2 pt. Wprowadzenie. Rozdział ten podzielony został na 11 podrozdziałów. Przegląd rozpoczyna zwięzły opis zmian klimatycznych zachodzących na świecie w ciągu ostatnich dekad oraz powiązanie ich z rosnącą emisją CO<sub>2</sub> do atmosfery. Istotną gałęzią przemysłu odpowiedzialną za emisję CO<sub>2</sub> jest energetyka oparta na spalaniu paliw kopalnych. W związku z tym konieczne staje się rozwijanie źródeł energii, które będą charakteryzowały się niską emisją CO<sub>2</sub> i innych gazów cieplarnianych tj. odnawialne źródła energii oraz energetyka jądrowa. Na tym tle Doktorantka dokonuje porównania wad i zalet pozyskiwania energii pochodzącej z OZE i energetyki jądrowej. W efekcie dochodzi do słusznego wniosku, że choć OZE odgrywają ważną rolę i stanowią kluczowy element zrównoważonego systemu energetycznego wymagają uzupełnienia o inne źródła. W tym przypadku energetyka jądrowa wydaje się bardzo dobrą alternatywą. W dalszej kolejności Autorka przybliży problematykę związaną z ograniczeniami i wyzwaniami stojącymi przed obecnie funkcjonującymi elektrowniami jądrowymi. Zwracając uwagę na pomatu kurczące się i ograniczone terytorialnie zasoby uranu, stanowiącego podstawowe paliwo jądrowe. Zasoby te szacowane są obecnie na ok. 90 lat. W efekcie skłania to do konieczności poszukiwania alternatywnych paliw jądrowych, ewentualnie ponownego wykorzystania składowanego wypalonego paliwa jądrowego. Dodatkowo rosnące wymogi bezpieczeństwa, niezawodności, sprawności, odporności na proliferację skłaniają do stopniowego opracowywania i

wprowadzania tzw. reaktorów IV Generacji. Jednym z przykładów tego typu rozwiązań są reaktory prędkie chłodzone ciekłym ołowiem lub eutektycznym stopem ołów-bismut (LFR). Problematyka ta jest poruszana przez Doktorantkę w kolejnej części rozdziału. W tym przypadku za szczególnie istotny z perspektywy pracy należy uznać podrozdział pt. „Koszulka paliwowa, jako wyzwanie materiałowe”, gdzie wskazane zostały podstawowe właściwości jakie musi spełniać materiały, aby można by było go zastosować w tym celu. Jest to szereg wymagań, które niejednokrotnie wzajemnie się wykluczają powodując, że spełnienie ich przez jednorodny materiał staje się wręcz niemożliwe. Skłania to zatem do poszukiwania rozwiązań hybrydowych np. poprzez nanoszenie odpowiednich warstw na powierzchnię materiału bazowego.

Reaktory IV generacji charakteryzują się większą ilością generowanych uszkodzeń radiacyjnych w materiałach konstrukcyjnych. Wpływowi promieniowania jonizującego na materiały oraz mechanizmowi ich degradacji poświęcona jest dalsza część wprowadzenia. Skomplikowany opis oddziaływania różnego rodzaju promieniowania z materią został przedstawiony dość skrótowo, nie mniej jednak Autorka słusznie zauważa, że ze wszystkich rodzajów promieniowania występującego w rdzeniu tak naprawdę znaczenie ma jedynie promieniowanie neutronowe. Odpowiada ono za zdecydowaną większość generowanych uszkodzeń radiacyjnych. W tej części pracy zwrócona jest też uwaga na istotny wpływ jednocześnie promieniowania i temperatury na późniejszy mechanizm degradacji i zmian właściwości materiałów w trakcie pracy. Przykładem tego może być np. puchnięcie, które występuje w ograniczonym zakresie temperatur charakterystycznym dla danego materiału. Problem ten dotyczy wszystkich mechanizmów degradacji materiałów pod wpływem jednoczesnego generowania defektów i temperatury. Z perspektywy celu pracy istotny jest podrozdział pt. „Strategie projektowania materiałów odpornych radiacyjnie”. Tutaj zgodzić się należy, że jedną z tych strategii jest celowe wprowadzanie defektów, zaburzeń strukturalnych mających za zadanie ułatwić procesy anihilacji defektów przy jednoczesnym ograniczeniu ich tendencji do lokowania się w pobliżu powierzchni, czy granic międzyziarnowych. W tym przypadku rzeczywiście materiały amorficzne, pozbawione dalekozasięgowego uporządkowania, cechują się podniesioną odpornością na działanie promieniowania.

Ostatnią część tego rozdziału stanowi przybliżenie czytelnikowi warunków pracy jakim poddane zostaną koszulki paliwowe w reaktorze LFR. Tutaj zwrócić należy uwagę na bardzo silne defektowanie radiacyjne, szacowny poziom uszkodzeń radiacyjnych ok. 100 dpa / 5lat (ok. 5 razy więcej niż w PWR), przy jednoczesnej temperaturze pracy na poziomie 390°C – 520°C w środowisku ciekłego ołowiu. Warunki te prowadzą do przyspieszonej degradacji typowych stali reaktorowych. Pewnym sposobem rozwiązania tego problemu jest zastosowanie różnego typu warstw ochronnych. Jednym z proponowanych rozwiązań jest nanoszenie warstw amorficznych

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Autorka przybliży podstawowe właściwości takich warstw w końcowej części rozdziału. Zwracając uwagę na dość zaskakującą literaturową obserwację eksperymentalną, wykazaną symulacjami teoretycznymi, o dużej plastyczności warstw amorficznych Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

W rozdziale 3 pt. „Metodologia badań” Doktorantka dokonuje zwięzłej charakterystyki stosowanych metod badawczych, których opis podzieliła na trzy główne części tj. nanoszenie warstw metodą ablacji laserowej PVD, defektowania wiązką jonów oraz przedstawia technikę nanoindentacji, która jest główną techniką pomiarową. Amorficzne warstwy Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> uzyskane zostały we współpracy z dr. Di Fonzo z Istituto Italiano di Tecnologia z Włoch w ramach projektu GEMMA finansowanego przez Komisję Europejską, w którym grupa z NCBJ brała udział. Otrzymane warstwy defektowane były przy użyciu wiązek ciężkich jonów. W tym przypadku bardzo istotne jest dobranie odpowiednich parametrów prowadzenia procesu tak aby wygenerować uszkodzenia radiacyjne w sposób odpowiadający wpływowi promieniowania neutronowego. W tym przypadku na szczególną uwagę zasługuje zwrócenie uwagi przez Doktorantkę na szereg ograniczeń i różnic pomiędzy defektowaniem przy wykorzystaniu ciężkich jonów a neutronów. Przeprowadzone symulacje Monte Carlo z wykorzystaniem programu SRIM pozwoliły na precyzyjny dobór parametrów wiązki i określenie rozkładu energii zdeponowanej przez jony w funkcji głębokości modyfikowanego materiału. Ze względu na powierzchniowy charakter generowanych defektów logicznym staje się zastosowanie metody nanoindentacji do obserwacji zmian właściwości mechanicznych warstw. Metoda jest przybliżona w dalszej części rozdziału.

Wprowadzenie zamyka rozdział 4 w którym Doktorantka dokonuje uzasadnienia wyboru tematu, jednoznacznie przedstawia hipotezę, cele badawcze i zakres prowadzonych prac.

Podsumowując część literaturową muszę stwierdzić, że bardzo dobrze wprowadza ona czytelnika w zagadnienie poruszane w dalszej części pracy. Stanowi również dobrze przemyślany ciąg logiczny. Objętość tej części jest również dobrze wyważona przy zachowaniu odpowiednich proporcji pomiędzy ogólnością a szczegółowością prezentowanych tematów. Można również stwierdzić, że Pani mgr Agata Zaborowska przedstawia szerokie tło naukowe, dokonuje wnikliwego przeglądu literatury i precyzyjnie definiuje problem badawczy. Jednocześnie wprowadzenie w sposób logiczny i przekonujący łączy tematykę poszczególnych artykułów, uzasadniając ich kolejność i rolę w realizacji głównego celu rozprawy.

## *2.2. Analiza cyklu publikacji*

Podstawą recenzowanej pracy jest cykl 4 opublikowanych publikacji naukowych, które ukazały się w: Surface and Coatings Technology (IF=5.4, MNiSW=100pkt), Ceramics International (IF=5.1, MNiSW=100pkt) – dwie publikacje, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B (IF=1.4,

MNiSW=70pkt). Łączny współczynnik wpływu IF artykułów cyklu wynosi 17, natomiast sumaryczna liczba punktów Ministerialnych 370 pkt. We wszystkich artykułach Doktorantka jest pierwszą autorką, a w przypadku trzech z nich pełni dodatkowo rolę autora korespondencyjnego. Potwierdza to tym samym jej wiodący wkład w powstanie wszystkich tych prac. Wszystkie prace ukazały się w uznanych czasopismach naukowych o wysokim współczynniku IF, co samo w sobie świadczy o wysokiej jakości merytorycznej przedstawionych badań oraz ich innowacyjnym charakterze. W każdym z tych czasopism przedłożony manuskrypt podlega recenzji przez co najmniej dwóch niezależnych recenzentów. Oznacza to, że wyniki badań zostały pozytywnie zweryfikowane przez niezależnych, międzynarodowych ekspertów, co z drugiej strony znacznie ułatwia pracę recenzentowi.

Wszystkie publikacje dotyczą problematyki wpływu defektowania radiacyjnego na wybrane właściwości amorficznych warstw  $\text{Al}_2\text{O}_3$  osadzonych na podłożach ze stali 316L. Jest to w pełni zgodne z tematyką przedstawionej rozprawy. Cykl otwiera publikacja, w której Doktorantka bada wpływ defektowania strumieniem jonów  $\text{Au}^+$  na właściwości mechaniczne. Badania prowadzone są w szerokim zakresie wygenerowany uszkodzeń dochodzącym do 50 dpa. Oprócz charakterystyk mechanicznych Autorka prowadzi analizę mikrostrukturalną SEM oraz badania strukturalne z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej z użyciem kąta ślizgowego (GIXRD). Ze względu na ograniczenia aparaturowe eksperyment prowadzony był dla stosunkowo niskich energii jonów, co znacznie ograniczyło głębokość warstwy zdefektowanej ograniczając tym samym dokładność prowadzonych badań. Nie mniej jednak udało się jej zaobserwować, że otrzymane powłoki wskazują na ich wysoką stabilność pod wpływem promieniowania. Dodatkowo przeprowadzone badania wpływu defektowania podłoży jonami  $\text{Fe}^{2+}$  wykazały, oczekiwany wzrost twardości podłoża będący wynikiem kumulacji defektów ograniczających ruch dyslokacji. Obiecujące obserwacje poczynione w pierwszej publikacji Autorka kontynuuje w kolejnej. W tym przypadku kontynuowano naświetlanie jonami  $\text{Au}^+$ , lecz o znacznie większej energii, dzięki uzyskanemu dostępowi do bardziej zaawansowanej infrastruktury NorFab w Norwegii. Wzrost energii jonów pozwolił na znaczne zwiększenie głębokości defektowania zwiększając tym samym objętość materiału poddanego uszkodzeniom. W tym przypadku oprócz nanoindentacji Autorka skupiła się głębiej na badaniach mikrostrukturalnych i strukturalnych, rozszerzając poprzednie techniki pomiarowe o transmisyjny mikroskop elektronowy (HRTEM), dyfrakcję elektronów (SAED). Wyniki jednoznacznie potwierdziły amorficzny charakter warstw nawet w wyniku silnego defektowania. Zwróciła również uwagę na obserwację interfejsu powłoka – podłoże, który również nie uległ zmianom pod wpływem promieniowania. Uzyskane wyniki pozwoliły jej jednoznacznie potwierdzić stabilność mechaniczną i strukturalną materiałów pod wpływem promieniowania w temperaturze pokojowej. Uzyskane wyniki z dwóch niezależnych eksperymentów Autorka porównuje w publikacji nr 3 cyklu. Obserwuje bardzo dobrą zgodność pomiędzy wynikami mimo naświetlania próbek na różnych urządzeniach i w różnych warunkach. Publikacją wieńczącą

prowadzone badania jest 4 publikacja cyklu, w której Doktoranta prowadzi badania wpływu temperatury na analizowane powłoki. W efekcie stwierdza, że układ powłoka – podłoże zachowuje kompatybilność mechaniczną do temperatury 600°C, a zdolność do odkształceń plastycznych powłoki rośnie wraz z temperaturą. Uzyskane wyniki, są zgodne z opublikowanymi wcześniej doniesieniami literaturowymi o występowaniu odkształcenia plastycznego w amorficznym tlenku glinu. Wykorzystując badania HT-XRD stwierdza, że krystalizacja fazy amorficznej rozpoczyna się w temperaturze ok. 700°C. Wskazuje to na potencjalną możliwość wykorzystania amorficznych powłok  $\text{Al}_2\text{O}_3$  przy projektowaniu elementów rdzenia reaktora LFR.

Na podstawie analizy zamieszczonych artykułów można jednoznacznie stwierdzić, że każda kolejna publikacja bazuje na wynikach poprzedniej. Wszystkie one tworzą logiczny ciąg badawczy pokazujący stopniową ewolucję myśli naukowej oraz metodyki, w kierunku kompleksowego rozwiązania problemu badawczego. Tym samym jednoznacznie potwierdzają spójność merytoryczną całego cyklu. Analizując zamieszczony na końcu publikacji wkład poszczególnych autorów oraz biorąc pod uwagę, że w każdej z nich Doktoranta jest pierwszym autorem i w 3 pełni dodatkowo rolę autora korespondencyjnego można uznać, że jej wkład w ich powstanie był wiodący. Miała Ona również swój istotny wkład w formułowanie koncepcji, projektowaniu i prowadzeniu badań, analizie i interpretacji wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Pozwala mi to jednoznacznie stwierdzić, że zamieszczony cykl spełnia wszystkie wymogi formalne i zwyczajowe, aby go uznać za podstawę do nadania stopnia doktora mgr inż. Agacie Zaborowskiej.

Nowatorstwo i wkład pracy w rozwój nauki zostały w tym przypadku potwierdzone na etapie recenzji wydawniczych poszczególnych artykułów. Nie mniej jednak na podstawie analizy całości pracy Doktorantka wyciągnęła szereg kluczowych wniosków tj.: analizowane warstwy wykazują wysoką odporność na defektowanie radiacyjne; warstwy amorficzne wykazują zdolność do odkształcenia plastycznego, która zwiększa się wraz z temperaturą; otrzymane warstwy są stabilne termicznie do ok. 700°C, po czym następują kolejne przemiany fazowe dążące do wytworzenia stabilnej termodynamicznie fazy  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Wyciągnięte wnioski całościowe, wykonane badania oraz przeprowadzona interpretacja wyników wnoszą istotny wkład w rozwój inżynierii materiałowej. Zaproponowane cele badawcze zostały w pełni zrealizowane, a postawiona główna hipoteza wykazana w toku prowadzonych badań i uzyskanych wyników. Otrzymane wyniki poszerzają znacznie obecny stan wiedzy o wpływ promieniowania i temperatury na właściwości analizowanych materiałów. Ma to niewątpliwie istotne znaczenie przy projektowaniu nowych materiałów do zastosowań w reaktorach IV generacji, a w szczególności reaktorach LFR. Dodatkowym wkładem Doktorantki jest nie tylko treść poszczególnych publikacji, ale również umiejętność zintegrowania ich w spójną narrację naukową.

Należy również podkreślić, że Doktorantka posiada już spory dorobek publikacyjny. Jest współautorką 8 innych publikacji (poza cyklem), których tematyka jest związana z: wpływem promieniowania oraz właściwościami mechanicznymi różnego typu stali. Wszystkie one ukazały się w uznanych czasopismach naukowych posiadających współczynnik wpływu IF. Jest również współautorką 8 wystąpień konferencyjnych ustnych i plakatowych na uznanych konferencjach międzynarodowych. Biorąc pod uwagę, że mgr inż. Agata Zaborowska znajduje się na początku swojej kariery naukowej jej dorobek całościowy jest już bardzo znaczący.

### **3. Kwestie do dyskusji i uwagi do rozprawy**

Praca stoi na bardzo wysokim poziomie merytorycznym, a przedstawione wyniki i ich interpretacja są wyczerpujące. Niemniej jednak, w ramach dyskusji, pragnę poruszyć kilka kwestii oraz przedstawić drobne uwagi, które nasunęły mi się podczas lektury.

Pytania do dyskusji podczas obrony:

- W kontekście zastosowań na koszulki paliwowe, standardem w przemyśle jądrowym są stopy cyrkonu (np. Zircaloy-4). Interesującym byłoby poznanie motywacji, która stała za wyborem stali austenitycznej 316L jako materiału podłoża w prowadzonych badaniach. Jakie są potencjalne przewagi i ograniczenia tego wyboru w specyficznym środowisku reaktora typu LFR?
- Kluczowym parametrem dla koszulek paliwowych jest efektywne odprowadzanie ciepła z paliwa do chłodziwa. Powłoka ceramiczna, jaką jest  $Al_2O_3$ , stanowi barierę termiczną, co może pogarszać ten parametr. Chciałbym prosić Doktorantkę o komentarz, czy wprowadzenie tej warstwy może wpłynąć na bilans cieplny i czy ten aspekt był analizowany pod kątem wydajności reaktora.

Drobne uwagi o charakterze redakcyjnym:

- W rozdziale „Zakres pracy” (str. 70) znajduje się informacja o próbie modelowania komputerowego z użyciem dynamiki molekularnej (MD) w ramach publikacji wchodzących w skład cyklu. Analiza załączników wskazuje jednak, że symulacje te są częścią innej publikacji Doktorantki, niewchodzącej w skład cyklu.
- Zwraca uwagę niską czytelność Rysunku 6, przedstawiającego koncepcje reaktorów IV generacji.
- W tekście często pojawia się anglicyzm „system”, który w wielu kontekstach można by z powodzeniem zastąpić terminem „układ”.



Powyższe uwagi w żaden sposób nie umniejszają bardzo wysokiej oceny rozprawy, a jedynie mają na celu stanowić przyczynek do dalszej, owocnej dyskusji naukowej.

#### **4. Wniosek końcowy**

Oceniając całość pracy należy stwierdzić, że stanowi ona bardzo oryginalne podejście do opisu problemu wpływu promieniowania jonizującego na właściwości strukturalne i mechaniczne materiałów na koszulki paliwowe w reaktorach LFR. Sposób przedstawienia wyników badań oraz ich interpretacja wskazują na bardzo dobre przygotowanie Doktorantki w zakresie inżynierii materiałowej. Szczegółowy opis przeprowadzonych eksperymentów i bardzo klarowny sposób interpretacji uzyskanych wyników badań stawia recenzenta w kłopotliwej sytuacji, gdyż niejednokrotnie trudno z nimi polemizować. Natomiast wymienione przeze mnie drobne potknięcia w żadnym stopniu nie umniejszają mojej wysokiej oceny recenzowanej pracy i całości dorobku mgr inż. Agaty Zaborowskiej.

Prezentowany cykl czterech publikacji naukowych, wraz z wprowadzeniem i syntetycznym podsumowaniem, stanowi spójną i kompletną całość naukową. Praca w pełni dokumentuje znaczący wkład Doktorantki w rozwiązanie istotnego problemu badawczego. Jakość czasopism, w których ukazały się artykuły, potwierdza wysoki poziom merytoryczny i międzynarodowy wydźwięk uzyskanych wyników. Dodatkowo biorąc pod uwagę nowatorski charakter, unikalność prowadzonych badań oraz całościowy dorobek Doktorantki stwierdzam, że opiniowana praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.), a także wymaganiami określonymi w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571) i na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa na Politechnice Warszawskiej o dopuszczenie mgr inż. Agaty Zaborowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Wnoszę również o wyróżnienie rozprawy.

dr. hab. inż. Paweł Stoch, prof. AGH

