

Recenzja w sprawie nadania lub odmowy nadania stopnia doktora w przewodzie doktorskim mgr. Eweliny Kucal

Mgr Ewelina Kucal przedstawiła rozprawę doktorską pt. „Modeling of neutron radiation damage in ceramic construction materials for the Dual Fluid Reactor using heavy ions”. Rozprawa doktorska została przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. Konrada Czerskiego. Promotorem pomocniczym był dr Cyprian Mieszczyński.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów: Wstępu, Wyzwanie materiałowe dla przemysłu jądrowego, Uszkodzenia radiacyjne, Metody obliczeniowe, Badania eksperymentalne, Dyskusja, Wnioski. Poświęcona jest wpływowi defektów radiacyjnych na właściwości strukturalne i mechaniczne materiałów konstrukcyjnych, które będą stosowane w reaktorach jądrowych najnowszej generacji. Badany jest wpływ napromieniowania neutronami i ciężkimi jonami na właściwości węgla krzemu (SiC), który może być materiałem konstrukcyjnym newralgicznej części reaktora dwupłynowego. Reaktor dwupłynowy jest reaktorem wysokotemperaturowym wykorzystującym neutrony prędkie.

Koncepcję reaktora dwupłynowego opracowała i opatentowała międzynarodowa grupa 6 naukowców. Jednym z członków tej grupy jest prof. Czerski. Reaktor dwupłynowy, to nowatorska koncepcja reaktora pracującego w temperaturze powyżej 1 000°C. Oznacza to, że materiały konstrukcyjne muszą być odporne na wysokie temperatury, korozję oraz uszkodzenia radiacyjne wytwarzane przez kilkadziesiąt lat pracy reaktora.

Badania uszkodzeń radiacyjnych SiC wywołanych napromieniowaniem neutronami w ciągu kilkudziesięciu lat eksploatacji można przyspieszyć poprzez napromieniowanie ciężkimi jonami. Napromieniowanie ciężkimi jonami jest stosowane do badania defektów radiacyjnych, ponieważ zapewnia znacznie wyższe szybkości generowania defektów radiacyjnych (10^{-3} - 10^{-4} dpa/s) niż napromieniowanie neutronami (10^{-6} - 10^{-7} dpa/s). W rezultacie możliwe jest symulowanie defektów radiacyjnych indukowanych w materiałach reaktora jądrowego przez miesiące lub lata przy zerowej lub niewielkiej aktywności radioaktywnej napromieniowanych materiałów. Z drugiej strony, mikrostruktury powstałe przy wysokich prędkościach generowania defektów mogą się znacznie różnić się od tych powstałych przy niskich prędkościach.

- Wysokie tempo powstawania defektów pociąga za sobą wysokie tempo rekombinacji defektów.
- Energia odrzutu atomu po zderzeniu z neutronami i jonami może być zupełnie inna, co prowadzi do różnic w ewolucji wytwarzanych defektów radiacyjnych
- Hel wytwarzany w reakcjach (n, α) i innych reakcjach transmutacji w reaktorach jądrowych nie może być wytwarzany przez napromieniowanie jonowe, co często wymaga przeprowadzenia eksperymentów z podwójnym napromieniowaniem jonowym z wykorzystaniem jonów helu.

Dodatkowym uzasadnieniem badania defektów radiacyjnych spowodowanych naświetleniem ciężkimi jonami jest nowatorski mechanizm funkcjonowania reaktora dwupłynowego. Fragmenty rozszczepienia jąder uranu to wielokrotnie naładowane ciężkie

jony o energii kilkudziesięciu MeV. Będą one bombardować elementy pierwotnego obiegu paliwa w rdzeniu reaktora wykonane z SiC podczas wieloletniego funkcjonowania reaktora.

Czas oddziaływania szybkich jonów z materiałem tarczy jest bardzo krótki. Ocenia się, że pierwotne zderzenia jonów z atomami tarczy wywołujące efekt domina trwają $\sim 10^{-18}$ s, hamowanie elektronowe $\sim 10^{-16}$ s, hamowanie jądrowe $\sim 10^{-13}$ s, tworzenia kolca termicznego (thermal spike) $\sim 10^{-11}$ s. Nie ma możliwości eksperymentalnego badania poszczególnych etapów tego procesu. Możemy badać jego skutki po zakończeniu procesu ewolucji i wygrzewania defektów radiacyjnych.

Właściwym było przeprowadzenie obliczeń za pomocą programów numerycznych opartych na modelu „thermal spike” oraz metodami dynamiki molekularnej. Głębokościowe rozkłady defektów symulowano metodą Monte Carlo za pomocą kodu McChasy’ego. Wyniki symulacji komputerowych porównano z rezultatami przeprowadzonych eksperymentów.

Monokryształy 3C-SiC <100> naświetlono jonami Si o energii: 21, 5 i 0,5 MeV oraz jonami węgla o energii: 5, 1 i 0,5 MeV. Naświetlanie przeprowadzono w Centrum Helmholtza w Rozendorfie (Niemcy). Zmiana strumienia i energii implantowanych jonów umożliwiła wytworzenie określonej koncentracji defektów na zadanej głębokości próbki. Podniesienie temperatury próbek podczas naświetlania do 800°C powoduje wygrzewanie części defektów co zbliżone jest do warunków, które będą panowały podczas pracy reaktora wysokotemperaturowego.

Ilość defektów radiacyjnych zmierzona została metodą rozpraszania wstecznego jonów He w trybie kanałowania. Jony helu przyspieszono do energii 1.7 MeV w akceleratorze Van de Graffa. Zmierzona ilość defektów radiacyjnych jest mniejsza niż wynika to z symulacji komputerowych oraz ich rozkład głębokościowy jest inny od oczekiwanego. Oznacza to, że część defektów radiacyjnych została wygrzana dzięki energii deponowanej podczas hamowania elektronowego.

Doktorantka posiada jedną publikację: E. Kucala, K. Czerski, Z. Kozioł, Molecular Dynamics Simulations of Primary Radiation Damage in Silicon Carbide, Acta Physica Polonica A 142 (2022), 747-752 DOI: 10.12693/APhysPolA.142.747. Jest ona bezpośrednio związana z rozprawą doktorską. Szkoda, że nie została uwzględniona w spisie literatury. Druga publikacja ukaże się niebawem.

Treść rozprawy przedstawiona jest w zwięzły i zrozumiały sposób. Rozprawa przygotowana jest dość starannie, ale zawiera usterki redakcyjne - brak interpunkcji przy wzorach. Dyskusyjne jest skracanie listy współautorów do pierwszej osoby przy większej liczbie współautorów. Na uwagę zasługuje sposób prezentacji wyników obliczeń wykonanych za pomocą kompletu programów SRIM. Na jednym rysunku, charakterystyczne zmiany przedstawiono za pomocą kilku wzajemnie uzupełniających się wykresów.

Ciekawe są wyniki symulacji zmiany liczby wakansji po kolizji jonów argonu z 3C-SiC w pikosekundowym przedziale czasowym rys. 4.20- 4.28. Dlaczego takich symulacji nie wykonano dla jonów Si oraz C. Oddziaływanie jonów Ar z węglikiem krzemu jest ciekawe, ale nie jest bezpośrednio związane z przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Celem rozprawy doktorskiej było obliczenie pierwotnej ilości uszkodzeń radiacyjnych wytworzonych podczas naświetlania węglika krzemu jonami krzemu i węgla i porównanie ich z ilością i rozkładem głębokościowym po zakończeniu naświetlania. Energia deponowana podczas hamowania elektronowego jonów przekazywana jest tarczy w obszarze skupionym wokół trajektorii jonów co przyspiesza ewolucję i powoduje wygrzewanie części defektów radiacyjnych. Efekty naprawy uszkodzeń radiacyjnych rekomendują wykorzystanie SiC jako materiału do konstrukcji instalacji reaktora wysokotemperaturowego. Naświetlanie ciężkimi

jonami może być wykorzystywane do badania uszkodzeń radiacyjnych podczas długotrwałego naświetlania neutronami materiałów konstrukcyjnych reaktorów wysokotemperaturowych.

Wysoko oceniam wyniki zawarte w związanej im krótkiej rozprawie doktorskiej. Nie wszystkie są zawarte w opublikowanych materiałach. Wskazany jest dokończenie procesu publikowania w specjalistycznych czasopismach.

Rozprawa doktorska mgr. Eweliny Kucal spełnia wymagania przewidziane przez obowiązującą ustawę. Stawiam wniosek o dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauki ścisłe i przyrodnicze w dyscyplinie nauki fizyczne.

M. Budzyński