



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
Tel: +48 (12) 617 25 85
Fax: +48 (12) 617 33 39

AGH

dr hab. inż. Robert Chulist, prof. AGH e-mail: rchulist@agh.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Edyty Wyszukowskiej

(imię i nazwisko doktorantki)

pod tytułem: "Impact of Radiation Damage on the Structural and Mechanical Properties of fcc NixFe1-x Single Crystal Alloys"

przygotowanej pod kierunkiem:

Promotor: dr hab. inż. Łukasz Kurpaska, prof. NCBJ

1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej, na zlecenie Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa PW z dnia 27 czerwca 2025 roku.

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 Doktorantki w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- 2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;

- 3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Edyty Wyszowskiej dotyczy kompleksowych badań monokrystalicznych stopów z układu Ni-Fe i koncentruje się na projektowaniu materiałów wykazujących wysoką odporność na uszkodzenia radiacyjne. Praca została napisana w języku angielskim i oparta jest na spójnym tematycznie cyklu pięciu publikacji naukowych, z których każda posiada wysoki współczynnik oddziaływania (impact factor).

Głównym celem badań było opracowanie nowych stopów monokrystalicznych na bazie Ni-Fe o zróżnicowanej zawartości żelaza, aby określić wpływ składu chemicznego oraz uporządkowania fazowego na powstawanie defektów radiacyjnych, przy wykorzystaniu napromieniowania jonowego. W ramach pracy sformułowano następujące cele badawcze:

- Przeprowadzenie procesu defektowania przy użyciu strumienia jonów,
- Wykonanie spektrometrii z rozpraszaniem wstecznym (RBS),
- Przeprowadzenie badań TEM,
- Dopasowanie danych eksperymentalnych do symulacji Monte Carlo w celu oceny poziomu uszkodzeń radiacyjnych,
- Przeprowadzenie symulacji dynamiki molekularnej (MD) w celu analizy migracji i ewolucji defektów strukturalnych,
- Ocena nanotwardości po implantacji jonowej.

Z tak szeroko zakrojonych badań wyłonił się nadrzędny cel pracy, jakim była ilościowa i jakościowa ocena wpływu zawartości żelaza w stopach monokrystalicznych Ni-Fe na gęstość defektów radiacyjnych powstałych w wyniku

napromieniowania jonowego. Realizacja tego celu przyczyniła się do poszerzenia wiedzy na temat nowych materiałów o unikalnych właściwościach oraz wskazania kierunków dalszych badań. W związku z powyższym tematyka rozprawy wpisuje się w aktualne, nowoczesne nurty badawcze w inżynierii materiałowej i należy ją uznać za trafnie dobraną oraz niezwykle aktualną.

Struktura rozprawy

Rozprawa liczy 190 stron, a jej centralną część stanowi pięć powiązanych tematycznie publikacji. Wszystkie koncentrują się na badaniach monokryształów z układu Ni-Fe, co potwierdza ich spójność tematyczną. Pozostałe części stanowią układ klasyczny i obejmują: wstęp, przegląd literatury, tezę i cel pracy, charakterystykę materiałów oraz metod badawczych, dyskusję i wnioski końcowe, a także liczbę 194 pozycji bibliograficznych. Na szczególne uznanie zasługują: merytoryczny i dobrze napisany wstęp, obszerny przegląd literatury, logiczne podsumowania po każdym rozdziale oraz czytelne wprowadzenia do poszczególnych publikacji. Całość pracy cechuje wysoki poziom redakcyjny, staranność opracowania graficznego oraz wysoka jakość ilustracji i wykresów.

Ocena merytoryczna

Autorka podjęła się realizacji bardzo ambitnego i złożonego planu badawczego. Zarówno obliczenia teoretyczne, jak i eksperymenty laboratoryjne, dobór technik badawczych, analiza oraz interpretacja wyników zostały przeprowadzone na wysokim poziomie. O wysokiej jakości badań świadczy fakt opublikowania ich w pięciu recenzowanych artykułach naukowych. Autorka jest pierwszym autorem w czterech z nich oraz drugim w jednej publikacji, co jednoznacznie wskazuje na jej kluczowy wkład. Nie jest moją intencją ponowne szczegółowe recenzowanie opublikowanych już prac, jednak warto podkreślić ich łączny impact factor wynoszący 25,3 oraz 590 punktów ministerialnych, co potwierdza ich dużą wartość

naukową. Przechodząc do opisu poszczególnych rozdziałów, w przeglądzie literatury Autorka w klarowny sposób omówiła zagadnienia związane z defektami radiacyjnymi, ich wpływem na własności mechaniczne materiałów, a także metody implementacji jonów. Następnie przedstawiła aktualny stan wiedzy na temat materiałów stosowanych w energetyce jądrowej oraz motywację do wykorzystania monokryształów Ni-Fe jako obiektów badawczych. Rozdział metodologiczny obejmuje zarówno techniki eksperymentalne (RBS, nanoindentacja, TEM), jak i zaawansowane symulacje komputerowe (Monte Carlo, MD, Hybrid MC). Należy nadmienić, iż połączenie wyników eksperymentalnych z modelowaniem teoretycznym pozwoliło uzyskać spójny obraz degradacji materiałów pod wpływem promieniowania jonowego.

Omówienie wyników

W części poświęconej wynikom badań Autorka przedstawiła kolejno pięć publikacji:

Pierwszy artykuł dotyczy porównania dwóch monokryształów o różnych składach chemicznych: $\text{Ni}_{0.62}\text{Fe}_{0.38}$ oraz $\text{Ni}_{0.38}\text{Fe}_{0.62}$. Wykazano, że zwiększenie zawartości Fe wpływa korzystnie na odporność radiacyjną stopów. **Drugi artykuł** omawia pięć różnych składów monokryształów, skupiając się na kinetyce powstawania defektów w zależności od zawartości Fe. **Trzecia praca** kompleksowo analizuje dynamikę powstawania defektów pod wpływem bombardowania jonowego, integrując zaawansowaną analizę TEM i modelowanie komputerowe. **Czwarty artykuł** opisuje rozwój programu umożliwiającego symulację widm uzyskanych ze spektrometrii z rozpraszaniem wstecznym Rutherforda. **W piątej publikacji** dokonano analizy ewolucji defektów w podwyższonych temperaturach.

Przedstawiony cykl prac stanowi spójną całość, umożliwiając pełną charakterystykę właściwości mechanicznych i mikrostrukturalnych monokryształów Ni-Fe w szerokim zakresie składu chemicznego i stopnia napromieniowania.

Uwagi i pytania (o charakterze dyskusyjnym):

Praca jako całość jest wykonana bardzo rzetelnie nie budząc większych wątpliwości. Drobne oraz szczegółowe uwagi/pytania przedstawiam poniżej:

1. Czy przewidywane są badania z udziałem materiałów polikrystalicznych? Analiza wpływu wielkości ziarna mogłaby uzupełnić wyniki uzyskane dla monokryształów wskazać ich zalety, wady. Naturalne wydaje się porównanie monokryształów z materiałami drobno i gruboziarnistymi.
2. Jak określono typ uporządkowania fazowego (np. $L1_2$, $L1_0$)? Jakie metody zastosowano?
3. Dlaczego wybrano orientację krystalograficzną $\langle 100 \rangle$? Czy analizowano wpływ innych, bardziej upakowanych płaszczyzn atomowych, takich jak (220) czy (111), na powstawanie defektów?
4. Czy znany jest stopień monokrystaliczności materiału? Czy występowały granice niskiego kąta?
5. Jak wyznaczono gęstość dyslokacji przy użyciu TEM?
6. W publikacjach wspomniano o fazie $FeNi_3$ – czy jej obecność została potwierdzona metodami dyfrakcyjnymi lub analizą chemiczną?
7. Jakie metody zastosowano do rozróżnienia typów defektów: tetraedrycznych błędów ułożenia, dyslokacji krawędziowych, pętli dyslokacyjnych czy klastrów atomowych?
8. Czy analizowano stopień uporządkowania monokryształów?
9. Czy próbowano zmieniać ten stopień np. poprzez szybkie chłodzenie?
10. Czy zmiany zawartości Fe wpływają na właściwości magnetyczne badanych stopów?
11. Czy podjęto próbę wyznaczenia temperatur charakterystycznych dla przemian porządek–nieporządek dla struktur typu $L1_2$ oraz $L1_0$?

Powyższe pytania mają charakter uzupełniający i wynikają wyłącznie z zainteresowań recenzenta. Nie wpływają one w żadnym stopniu na pozytywną ocenę merytoryczną rozprawy. Zagadnienie, którego podjęła się doktorantka, jest wyjątkowo złożone, wieloaspektowe i trudne badawczo, dlatego zawsze istnieje możliwość rozszerzenia

analiz o dodatkowe eksperymenty czy symulacje. Niemniej jednak liczba uzyskanych, oryginalnych wyników, ich jakość oraz sposób prezentacji świadczą o dogłębnym opanowaniu literatury przedmiotu oraz swobodnym poruszaniu się Autorki w obszarze inżynierii materiałowej i fizyki ciała stałego. Należy podkreślić, że Pani mgr inż. Edyta Wyszowska uzyskała bardzo wartościowe wyniki w zakresie kompleksowej analizy monokryształów Ni-Fe poddanych uszkodzeniom radiacyjnym, które zostały opublikowane w pięciu recenzowanych czasopismach naukowych. W swojej pracy wykazała się umiejętnością trafnego projektowania eksperymentów, rzetelną analizą danych oraz formułowania logicznych i dobrze uzasadnionych wniosków. Na szczególne wyróżnienie zasługują rezultaty przedstawione w pracy C, dotyczące wysokorozdzielczego obrazowania TEM, analizy defektów radiacyjnych oraz symulacji dynamiki molekularnej (MD), które umożliwiają śledzenie ewolucji defektów punktowych, liniowych i powierzchniowych. Warto również zaznaczyć, że Pani Edyta Wyszowska jest współautorką 25 innych publikacji, niezwiązanych bezpośrednio z omawianym cyklem prac. Świadczy to o jej szerokich zainteresowaniach naukowych oraz głębokim zrozumieniu badanej tematyki.

W podsumowaniu uważam, że opiniowana rozprawa doktorska, spełnia warunki określone obowiązującą ustawą o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z 16 kwietnia 2003 r. z późn. zm. Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Edyty Wyszowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Kraków, 17.09.2025

Robert Chulist