



Poznań, 17.03.2025r.

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Aleksandra Jana Albrechta
pt.: „Badanie przemian fazowych nanokrystalicznych azotków żelaza
o określonej wielkości krystalitów”**

**opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Zachodniopomorskiego
Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie na podstawie decyzji nr ZUT/RDICH/1/2025 z dnia
21.01.2025r.**

Rozprawa doktorska mgra Aleksandra Albrechta została zrealizowana w Katedrze Technologii Chemicznej Nieorganicznej i Inżynierii Środowiska na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym z Szczecinie pod kierunkiem dra hab. inż. Dariusza Moszyńskiego, prof. ZUT. Zakres prezentowanej pracy w ogólnym zarysie dotyczy zdefiniowania wpływu poszczególnych parametrów procesowych na rodzaj przemian fazowych nanokrystalicznych azotków żelaza zachodzących podczas prowadzenia procesu azotowania żelaza, a także próba oceny mechanizmu tego procesu.

Tematyka badań podjęta w rozprawie doktorskiej przez mgr Aleksandra Albrechta jest aktualna nie tylko z naukowego, ale także z praktycznego punktu widzenia, a prace związane z pokrywaniem żelaza warstwą jego azotku są przedmiotem badań renomowanych ośrodków naukowych na całym świecie. Potwierdzeniem tego faktu jest znaczna ilość doniesień literaturowych opublikowanych na przełomie ostatnich lat, bowiem pod hasłem „azotek żelaza” w bazie Scopus można znaleźć ponad 140 000 artykułów naukowych (dane z bazy SCOPUS z dn. 10.03.2025r.). Dane te jednoznacznie potwierdzają duże znaczenie badań prowadzonych nad tego typu związkami oraz uwypuklają konieczność szczegółowego poznania tych przemian, zwłaszcza biorąc pod uwagę ich złożoność.

Azotki żelaza to związki chemiczne powstające w wyniku reakcji żelaza z azotem. Mają szerokie zastosowanie głównie w metalurgii i inżynierii materiałowej ze względu na swoje korzystne właściwości, takie jak twardość, odporność na korozję i stabilność termiczną. Związki te cieszą się szczególnym

powodzeniem w procesach obróbki stali, gdzie wykorzystywane są do tworzenia powłok ochronnych i antykorozyjnych, co znajduje zastosowanie m.in. w lotnictwie, czy w procesach produkcji wyspecjalizowanych maszyn. W ostatnim czasie na znaczeniu zyskuje także wykorzystanie azotków żelaza w ogniwach paliwowych, gdzie potwierdzono ich potencjał do magazynowania wodoru. Niemniej proces tworzenia azotków żelaza wiąże się z kilkoma wyzwaniami technologicznymi i materiałowymi. Do największych wyzwań należą kontrola składu fazowego, co definiuje finalne właściwości mechaniczne i chemiczne materiału, a także optymalizacja temperatury i czasu procesu, co bezpośrednio wpływa na koszty i efektywność samego procesu. Celem zapewnienia zachodzenia pożądanych przemian fazowych i uzyskania produktu o odpowiednim dla twardości i odporności składzie fazowym konieczne jest też zapewnienie odpowiedniej kontroli atmosfery reakcyjnej oraz dyfuzji azotu w strukturze żelaza, co odbywać się może na kilka sposobów. Stały postęp związany z procesami azotowania żelaza, a także rosnąca możliwość projektowania i kontrolowania tych procesów ciągle rozszerza ich potencjalne zastosowanie. Ciągłe jednak konieczne jest szczegółowe zdefiniowanie wszystkich przemian zachodzących podczas tego procesu, a także opisanie kluczowych parametrów definiujących właściwości powłoki azotku żelaza. Pozwoli to dobór odpowiednich parametrów oraz podniesie trwałość wykonywanej powłoki, a takie parametry jak wielkość cząstek żelaza, czy temperatura procesu to krytyczne zmienne, które muszą zostać wnikliwie przeanalizowane przy projektowaniu wspomnianych procesów.

W ten nurt badawczy doskonale wpisuje się tematyka rozprawy doktorskiej Pana Aleksandra Albrechta, co jednoznacznie wskazuje na jej istotność i aktualność, a także na znaczny potencjał poznawczy. Celem badań zrealizowanych w ramach pracy było zbadanie procesów azotowania i odazotowania, zachodzących w warunkach zmiennego potencjału azotowego, dla materiałów żelazowych o strukturze nanokrystalicznej. W związku z tym w pracy szczegółowo zbadano zależność wartości potencjału azotowego wymaganego do zainicjowania przemian w nanokrystalicznym układzie Fe-N od czynników takich jak temperatura procesu, rozkład wielkości krystalitów i skład powierzchni azotowanego materiału. W trakcie prac wykonano:

- charakterystykę strukturalną i morfologiczną materiałów żelazowych o zmiennej wielkości cząstek, które poddawano azotowaniu;
- proces azotowania i odazotowania w zmiennych warunkach temperaturowych i przy zmiennej atmosferze azotującej;
- proces azotowania oraz odazotowania materiałów o zmiennej wielkości krystalitów w zmiennej atmosferze azotującej;
- opis mechanizmu reakcji azotowania i odazotowania wraz z opisem przejść fazowych.

Procesy azotowania oraz odazotowania prowadzono stosując materiały o zmiennej wielkości nanokrystalitów, a przemiany te prowadzono i analizowano *in situ* z wykorzystaniem proszkowej

dyfraktometrii rentgenowskiej (XRPD) oraz analizy termogravimetrycznej (TG). W pracy przeprowadzono także szereg analiz (*ex-situ*), jak np. elektronowe analizy mikroskopowe (SEM, TEM), które pomogły w interpretacji uzyskanych materiałów oraz w opisie zachodzących zmian. Za pomocą tych metod systematycznie zbadano wpływ temperatury na przebieg procesów azotowania i odazotowania dla materiałów o różnym rozkładzie wielkości kryształitów. Kluczowa jednak była zaawansowana ocena i opis przemian fazowych zachodzących na poszczególnych etapach procesu, co pozwoliło na zdefiniowanie mechanizmu procesu azotowania.

Rozprawa doktorska Pana mgr Aleksandra Albrecta w sumie liczy 187 stron, jest napisana w języku polskim i została zilustrowana 96 rysunkami oraz 15 tabelami. Przedkładana dysertacja przygotowana jest w niemal klasycznym układzie i podzielona jest na 8 głównych części, z czego najważniejsze rozdziały to: Wstęp (2 strony) Część literaturowa (26 stron), Cel pracy i hipotezy badawcze (2 strony) Część eksperymentalna (11 stron), Wyniki i dyskusja (98 stron) oraz Wnioski Końcowe (2 strony). Niezwykle wartościowe jest także zaprezentowanie w pracy algorytmów stosowanych w badaniach, jak i danych eksperymentalnych, które wspierają główne wyniki zaprezentowane w pracy. Całość pracy zwieńczona jest spisem literatury obejmującym aż 285, w zdecydowanej większości aktualnych artykułów naukowych. Cytowana literatura jest bogata, zróżnicowana i dobrana w odpowiedni sposób, a zaprezentowane przykłady właściwie ilustrują poruszane w pracy zagadnienia. Warto jednak byłoby umieścić w spisie cytowanej w pracy literatury także prace własne związane bezpośrednio z tematyką rozprawy, co byłoby wyraźnym wskazaniem, że wybrane tezy dysertacji zostały już opublikowane. W moim odczuciu, w kompozycji pracy brakuje dorobku naukowego oraz wykazu osiągnięć Doktoranta. Nie jest to co prawda element obowiązkowy, ale w doskonały sposób podsumowuje on dorobek Doktoranta, stąd moja prośba o wykazanie całego dorobku podczas obrony pracy.

Zaprezentowany w pracy przegląd literatury obejmuje 26 stron i został podzielony na 3 główne rozdziały i kilka podrozdziałów, w których Autor w sposób syntetyczny przedstawia zagadnienia związane z tematyką przedstawionej pracy. Zdefiniowano i opisano azotki żelaza, jak i scharakteryzowano ich główne właściwości oraz zależności definiujące w jaki sposób budowa strukturalna żelaza wpływa na przebieg procesu azotowania. W dalszych etapach części literaturowej Doktorant przybliżył zagadnienia związane z doбором technik i narzędzi badawczych, które wykorzystywane są do charakterystyki materiałów z naniesionymi powłokami azotku żelaza oraz umożliwiają śledzenie samego procesu azotowania. Ze względu na fakt, że jednym z najistotniejszych parametrów decydujących o przebiegu procesu azotowania jest wielkość kryształitów materiału żelazowego jedną z części wstępu teoretycznego Doktorant przeznaczył na opis technik analitycznych oraz obliczeń matematycznych/komputerowych jakie są wykorzystywane do określenia wielkości kryształitów. Interesujące we części teoretycznej są w szczególności fragmenty zawierające informacje nt. właściwości i charakterystyki wybranych faz

krystalicznych, jak i te opisujące w jaki sposób unikatowe cechy danej techniki mogą być przydatne przy opisie procesu azotowania. Część literaturowa pracy jest interesująca, a opisane tematy są trafnie dobrane i stanowią bardzo dobre wprowadzenie oraz tło merytoryczne do dalszych części rozprawy.

W kolejnej części pracy, a więc w rozdziale „część eksperymentalna”, Autor przedstawił koncepcję prac oraz szczegółowy opis stosowanych technik pomiarowych i badawczych służących osiągnięciu celu pracy. Opis ten zaprezentowany jest w sposób wyczerpujący, umożliwiający powtórzenie eksperymentów, a na wyróżnienie zasługuje szczegółowy opis stosowanych komór eksperymentalnych. Ze względu na wykorzystywanie dość zawansowanej aparatury, w tym w ośrodku zagranicznym prosiłbym o jasną wypowiedź które z pomiarów/analiz Doktorant wykonał samodzielnie, a które były realizowane przez przeszkolony personel?

W najobszerniejszej części pracy – „Wyniki i dyskusja” – Doktorant szeroko opisuje, jak i czytelnie przedstawia oraz interpretuje uzyskane wyniki badań. Część ta przygotowana jest w sposób logiczny i przejrzysty jak i dobrze zorganizowany oraz spójny. Część tę podzielić można na 3 główne rozdziały tematyczne, które obejmują 3 następujące bloki badawcze związane z:

- charakterystyką badanych materiałów;
- zdefiniowaniem wpływu temperatury na przebieg procesów azotowania i odazotowania w zmiennej atmosferze azotującej na przykładzie materiału Fe20;
- wpływ wielkości krystalitów na przebieg procesów w zmiennej atmosferze azotującej.

W pierwszym etapie prac przystąpiono do szczegółowej analizy i charakterystyki morfologicznej oraz strukturalnej wyjściowych materiałów żelazowych. W prac wykorzystano trzy materiały, którymi były: (i) nanokrystaliczny, przemysłowy katalizator syntezy amoniaku otrzymywany metodą stapiania (Fe20), (ii) komercyjny produkt otrzymywany metodą odparowania laserowego (Fe50) oraz (iii) produkt komercyjny, otrzymywany analogicznie do materiału (ii) przy czym odznaczający się większym rozmiarem cząstek (Fe100). Przygotowano także mieszaniny tych materiałów (Fe20/50 oraz Fe20/100) aby uzyskać materiały o wielkościach cząstek w zakresach pomiędzy wartościami charakterystycznymi dla substancji wyjściowych. Szczegółowa analiza potwierdziła, że materiały składają się głównie z żelaza, jednak w ich składzie pojawiają się domieszki innych pierwiastków, których zawartość nie przekracza kilku procent wagowych. Dodatkowo, cząstki wszystkich analizowanych materiałów mają sferyczny kształt i różnią się głównie wielkością cząstek. Kluczowe w tej części pracy było jednak określenie wielkości cząstek oraz krystalitów wykorzystanych materiałów. Na podstawie dostępnych informacji i badań własnych wyznaczono, że przybliżona wartość średniej wielkości krystalitów materiałów Fe20 wynosi ok. 20 nm, podczas gdy dla materiału Fe50 było to ok. 50 nm, a dla materiału Fe 100, wartości MCS oscylują ok 100 nm, pomimo, że specyfikacja wskazuje na deklarowaną wielkość cząstek na poziomie 40 do 60 nm.

Po dokonaniu charakterystyki wyjściowych materiałów, w kolejnych etapach prac Doktorant skupił się na określeniu wpływu temperatury oraz wielkości krystalitów na przebieg procesu azotowania. W tym celu opisano przebieg procesu azotowania realizowanego w temperaturach 350, 400, 450 i 500°C. W oparciu o rezultaty analizy termogravimetrycznej wykazano, że do osiągnięcia stężenia 40% obj. amoniaku, obserwuje się nieznaczny przyrost stopnia zaazotowania, a w zakresie stężenia amoniaku od 45 do 65% obj. obserwowano wyraźny przyrost masy próbki do wartości mN/mFe wynoszącej 0,059. Dodatkowo wykazano, że ok. 30% wag. materiału ulega konwersji do fazy o stechiometrii Fe_4N . Z kolei dalszy wzrost stężenia amoniaku nie powoduje znaczącej zmiany stopnia zaazotowania. Dalsza analiza przeprowadzonego procesu z wykorzystaniem analizy dyfrakcyjnej wykazała, że na dyfraktogramach widoczne są sygnały potwierdzające występowanie różnych faz krystalicznych, w tym α -Fe, γ' - Fe_4N oraz fazy ϵ - $Fe_{3-2}N$ które ulegają wzajemnym przejściom w trakcie procesu, przy czym w procesie prowadzonym w temperaturze 500°C nie zidentyfikowano obecności fazy ϵ - $Fe_{3-2}N$. Dalsze analizy dowiodły także, że w każdej z badanych temperatur obserwowano różnice przebiegów pomiędzy procesami azotowania i odazotowania (występowanie tzw. histerezy). Szczegółowa analiza i omówienie zachodzących przemian fazowych pozwoliła na podział badanych procesów na 10 obszarów obrazujących poszczególne przemiany. W 1. obszarze, podczas azotowania, występuje jedynie faza α -Fe. Obszar 2. odpowiada przemianie $\alpha \rightarrow \gamma'$. W obszarze 3. istnieje jedynie faza γ' . Przemianę $\gamma' \rightarrow \epsilon$ zawarto w obszarze 4. Obszar 5. odpowiada stanowi, w którym identyfikowana jest wyłącznie faza ϵ . Obszarem analogicznym do obszaru 5., występującym podczas odazotowania jest obszar 6. Obszar 7. rozpoczyna się wraz z pojawieniem się fazy γ' podczas przemiany $\epsilon \rightarrow \gamma'$. W kolejnym obszarze, oznaczonym numerem 8, obserwowane są jednocześnie trzy fazy: α , γ' i ϵ . Obszar 9. obejmuje zakres, w którym faza ϵ przestaje być obserwowalna, a w układzie współistnieją fazy α i γ' . Ostatnim z etapów jest obszar 10., w którym cały materiał występuje jako faza α -Fe. Jedną z istotniejszych obserwacji z przeprowadzonych badań stanowi także fakt, że podczas przemian $\alpha \rightarrow \gamma'$ i $\gamma' \rightarrow \epsilon$ w procesie azotowania, największe krystality reagują przy najniższych wartościach potencjału azotowego, a zwiększanie potencjału azotowego umożliwia zajście przemiany dla coraz mniejszych krystalitów. W swojej recenzji chciałbym podkreślić iż wyróżnienie oraz opisanie kolejnych obszarów i przemian fazowych w nich zachodzących jest znaczącym osiągnięciem w przedłożonej do oceny rozprawie.

Niezwykle istotna część badań zaprezentowanych w dysertacji dotyczy określenia wpływu wielkości krystalitów na przebieg procesów azotowania/odazotowania prowadzonych w zmiennej atmosferze azotującej. W części tej szczególną uwagę poświęcono na analizę omawianych procesów z wykorzystaniem materiałów Fe50, Fe100 oraz mieszanin Fe20/50 i Fe20/100. Wyniki analizy termogravimetrycznej uzyskane dla tych materiałów jasno potwierdzają występowanie histerezy w przebiegu procesów azotowania i odazotowania. Jednocześnie Doktorant podkreśla różny przebieg

otrzymanych krzywych, w zależności od wielkości krystalitów materiału oraz temperatury prowadzenia procesu, co wskazuje na występowanie różnych faz oraz różnych przemian fazowych w trakcie procesów. Więcej światła na występowanie zmian strukturalnych rzuca zaprezentowana przez Doktoranta analiza zmian strukturalnych. Doktorant wykazał, że dla większości analizowanych materiałów, w obszarze 1 procesu MCS fazy α -Fe jest stabilna, a parametr sieci fazy α w tym obszarze stopniowo rośnie. W obszarze 2. obserwowana jest wielostopniowa i skomplikowana przemiana fazowa α -Fe $\rightarrow$ γ' -Fe₄N. Przemianie tej towarzyszy zmniejszenie się MCS fazy α -Fe, z kolei wartość MCS fazy γ' pozostaje stała, a parametr sieci tej fazy wzrasta. Istotną różnicę w przebiegu procesów stanowi możliwość powstawania fazy ϵ . W temperaturze 400°C powstawanie tej fazy zachodzi stopniowo, czemu towarzyszy stabilizacja wartości parametru MCS. Z kolei w temperaturze 500°C, faza ϵ pozostaje na granicy oznaczalności, a MCS fazy γ' jest stabilny. Chciałbym też wyraźnie podkreślić, że jednym z najważniejszych wniosków płynących z zaprezentowanych w tej części wyników badań jest wskazanie na istnienie zjawiska spójności granic fazowych pomiędzy fazami, których struktury wykazują niewielkie niedopasowanie. Taki warunek może być spełniony podczas przemian pomiędzy fazami α -Fe, γ' -Fe₄N i ϵ -Fe₃₋₂N. Występowanie tego zjawiska pozwala na wytłumaczenie różnic w przebiegu procesów azotowania i odazotowania zachodzących w materiałach grubokrystalicznych i nanokrystalicznych rzucając nowe, niezwykle wartościowe spojrzenie na przebieg mechanizmów procesów azotowania. Opis zaprezentowanych wyników Doktorant zwięźliwie opisał mechanizmem realizowanych przemian. Na podstawie danych eksperymentalnych przedstawionych w poprzednich sekcjach i ich analizy zaproponowano mechanizm przemian fazowych podczas azotowania i odazotowania materiałów o rozmiarach charakterystycznych krystalitów żelaza. Mechanizm ten oparty jest na założeniu istnienia spójności pomiędzy krystalitem fazy pierwotnej, a tworzącym się zarodkiem nowej fazy i wyróżniono w nim 22 szczegółowo opisane i zinterpretowane etapy.

W kontekście omówionych wyżej osiągnięć chciałbym podkreślić, że recenzowana praca traktuje nie tylko o wykonaniu skutecznego procesu azotowania i odazotowania, ale stanowi także niezwykle zaawansowane studium na temat mechanizmów przemian fazowych zachodzących podczas tych procesów. Przedstawiony materiał, zarówno teoretyczny, jak i doświadczalny jest bogaty i zasługuje na wyróżnienie. Postawione cele badawcze zostały zrealizowane, a uzyskane rezultaty i opracowane na ich podstawie wnioski wnoszą istotny element nowości naukowej. Zrealizowane prace odznaczają się znaczną oryginalnością, a do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

- wykazanie, że przebieg procesów azotowania i odazotowania jest zależny od średniej wielkości krystalitów oraz od ich rozkładu wielkości;

- udowodnienie istnienia zjawiska spójności granic fazowych pomiędzy fazami, których struktury wykazują niewielkie niedopasowanie, co pozwala na wytłumaczenia różnic w przebiegu procesów azotowania i odazotowania zachodzących w materiałach grubokrystalicznych i nanokrystalicznych;
- zaproponowanie mechanizmu przemian fazowych zachodzących podczas azotowania i odazotowania materiałów.

Obowiązkiem recenzenta jest także wskazanie ewentualnych niedokładności, nieścisłości, bądź nieprecyzyjnych sformułowań, jak i ocena merytoryczna pracy, która ma wskazać pewne sugestie czy ewentualne korekty. Chciałbym podkreślić, że praca jest napisana starannie i poprawnie, zarówno językowo, jak i stylistycznie. Choć Autor nie ustrzegł się kilku błędów językowych, edytorskich czy stylistycznych to w żadnym stopniu nie wpływają one na pozytywny odbiór pracy. Mam jednak kilka uwag i pytań, które nasunęły mi się w trakcie lektury pracy, i które stawiam w celu doprecyzowania pewnych fragmentów celem zaspokojenia mojej ciekawości naukowej.

1. Czym się kierowano w doborze poszczególnych materiałów żelazowych i na ile wykorzystane w pracy materiały stanowią reprezentatywną próbkę materiałową?
2. Doktorant w pracy wskazuje na działania służące ograniczeniu błędów pomiarowych, jednak zagadnienie to nie jest zaprezentowane dostatecznie klarownie. Stąd moja prośba o wskazanie jakimi błędami, i skąd te błędy pochodzą obciążone pomiary termogravimetryczne oraz pomiary XRPD?
3. Autor obrazuje wpływ temperatury na proces azotowania na przykładzie materiału Fe₂₀ i dowodzi, że jest to reprezentatywny przykład także dla innym materiałów. Prosiłbym o doprecyzowanie na jakiej podstawie Doktorant formułuje to założenie i czy jest ono poparte rezultatami badań?
4. W pracy brakuje informacji w jakim stosunku/proporcji wagowej/objętościowej prekursorów powstały materiały Fe 20/50 oraz Fe 20/100.
5. W pracy wielokrotnie pojawia się stwierdzenie, zgodne z otrzymanymi danymi, że procesy azotowania/odazotowania realizowane w niższych temperaturach, jak i w temperaturze 500°C znacznie się do siebie różnią. Autor wskazuje na zachodzenie różnych przemian fazowych, co również jest zgodne z prawdą. Moje pytanie dotyczy natomiast podstaw dlaczego te procesy przebiegają w odmienny sposób i jakie zjawiska/przemiany powodują rozbieżności w przebiegu procesów azotowania w różnych temperaturach?
6. Prosiłbym Doktoranta a zaprezentowanie swojego aktualnego dorobku naukowego uwzględniającego osiągnięcia publikacyjne, konferencyjne, jak i zdobyte granty oraz odbyte staże naukowe. Jest to niezwykle ważna kwestia w rozwoju Doktoranta, a w pracy pojawiają się przesłanki wskazujące na znaczne osiągnięcia Doktoranta w tym zakresie.

Podsumowując, należy stwierdzić, że recenzowana rozprawa reprezentuje bardzo wysoki poziom naukowy, zawiera istotne elementy nowości naukowej, a wymienione wspomniane komentarze polemiczne i pytania nie umniejszają wysokiej oceny recenzowanej pracy. Doktorant uzyskał szereg ciekawych rezultatów, rzucających nowe światło na analizowane zagadnienia, które dodatkowo zostały już opublikowane. Na uwagę zasługuje szeroki zakres zrealizowanej pracy doświadczalnej oraz wykonanie zaawansowanych obliczeń pozwalających na rozwiązanie postawionych pytań. Autor wykazał się zdolnością prowadzenia studiów literaturowych, opracowania własnych metod służących do rozwiązania postawionego problemu i krytycznej oceny faktów, interpretacji wyników badań oraz formułowania wniosków.

Na podstawie oceny rozprawy doktorskiej autorstwa Pana Aleksandra Albrechta zatytułowanej „Badanie przemian fazowych nanokrystalicznych azotków żelaza o określonej wielkości krystalitów” oraz zawartej w pracy aktywności naukowej jednoznacznie stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wszystkie wymogi ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. Wniosuję zatem do Rady Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego o przyjęcie pracy i przeprowadzenie dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ponadto, biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom recenzowanej pracy doktorskiej, aktualność podjętej tematyki badawczej, zakres pracy eksperymentalnej, jakość wniosków i ich wkład w istniejący stan wiedzy, wnioskuję ponadto do Rady Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Aleksandra Albrechta. Uzasadniając ten wniosek, chciałbym zwrócić szczególną uwagę na ambitne podejście Autora do analizy i charakterystyki przemian fazowych zachodzących podczas azotowania żelaza, co może mieć bezpośrednie przełożenia na efektywność realizacji tych procesów. Temat azotowania i mechanizm tego procesu są już opisane w literaturze, dlatego wpisanie się w ten nurt badań, a dodatkowo zaproponowanie mechanizmu przemian fazowych, w moim odczuciu, wydaje się być istotnym osiągnięciem. Ten element rozprawy uważam za bardzo nowatorski i użyteczny, wskazujący ponadto na istotny potencjał analizowanych zagadnień. Wymiernym potwierdzeniem interdyscyplinarnego podejścia Doktoranta oraz jakości uzyskanych zależności eksperymentalnych jest także ranga czasopism, w których opublikowano wyniki prac związane bezpośrednio z tematyką przedkładanej rozprawy.

