



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**  
AGH UNIVERSITY OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGY

Prof. dr hab. inż. Piotr Bała

Kraków, dn. 11.09.2024

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej  
Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. **Bartosza Terleckiego**

pt. „**Niejednorodność orientacji i struktury w monokrystalicznych odlewach**

**CMSX-4 i CMSX-6”**

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dyrektora Instytutu Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Śląskiego, w związku z uchwałą Rady Naukowej Instytutu z dnia 09 lipca 2024 roku (pismo z dnia 10 lipca 2024 roku)

### **1. Ogólna charakterystyka pracy**

Praca doktorska Pana mgra inż. Bartosza Terleckiego, napisana pod kierownictwem dra hab. inż. Włodzimierza Bogdanowicza, prof. UŚ, dotyczy zaawansowanej analizy orientacji krystalograficznej monokrystalicznych łopatek silników odrzutowych. Praca ma układ klasyczny, tj. składa się z obszernego przeglądu stanu wiedzy i części badań własnych. Wstęp napisany i opracowany jest na dobrym poziomie. Oparty jest na odpowiednim przeglądzie literaturowym, który zawiera głównie specjalistyczne czasopisma (większość z ostatnich 10 lat), kilka podręczników akademickich oraz starszych pozycji naukowych przywołanych przy

omawianiu wybranych technik pomiarowych. Świadczy to o bardzo dobrej orientacji Doktoranta w temacie metod dyfrakcyjnych oraz badań orientacji krystalograficznej, jak również nadstopów na bazie niklu. Po wstępie Autor przedstawił tezę oraz cele naukowe pracy, obszerną charakterystykę materiału do badań wraz z opisem technologii wytwarzania badanych łopatek, szczegółowy opis metodyki, wyniki badań wraz z ich dyskusją oraz wnioski. Na końcu rozprawy zamieszczony jest spis literatury. Praca napisana jest na ogół poprawnym językiem technicznym z dobrze opracowanymi rysunkami oraz wysoką jakością wyników badań. Oceniając cały układ pracy uważam, że jest on właściwy i odpowiada ogólnie przyjętym wymaganiom co do tego typu opracowań.

## **2. Ocena doboru tematyki i zakresu pracy**

Branża lotnicza przeżywa dynamiczne zmiany, które mają istotny wpływ na jej przyszłość. Po znaczącym spadku liczby pasażerów i dochodów związanych z pandemią COVID-19, branża ta stopniowo się odbudowuje. Wzrost liczby podróży, zwłaszcza w sektorze krajowym i regionalnym, jest widoczny, a ilość lotów międzynarodowych wraca do poziomu z przed pandemii. Niemniej jednak wzrost cen paliw lotniczych stanowi wyzwanie dla wielu linii lotniczych, zwiększając koszty operacyjne i wpływając na rentowność. W związku z tym, wiele firm poszukuje sposobów na bardziej efektywne zarządzanie paliwem lub inwestuje w nowe technologie. Przemysł lotniczy inwestuje w nowe technologie, takie jak zaawansowane systemy zarządzania ruchem lotniczym, nowoczesne materiały kompozytowe, czy autonomiczne systemy. Nieustannie największy nacisk w nowoczesnych konstrukcjach samolotów kładzie się jednak na rozwój technologii silników odrzutowych. Wprowadzanie zaawansowanych technologii, takich jak silniki o wyższej efektywności i mniejszym śladzie węglowym, zwiększa zapotrzebowanie na nowoczesne silniki, a to z kolei napędza rozwój technologii wytwarzania poszczególnych komponentów silników oraz metod diagnostycznych do kontroli poprawności ich wykonania. Kluczowymi komponentami odpowiedzialnymi za bezpieczeństwo i stabilność procesów w silnikach odrzutowych są łopatki pierwszego i drugiego stopnia turbiny wysokiego ciśnienia. Ze względu na agresywne środowisko pracy łopatek, stosuje się zaawansowane techniki ich wytwarzania oraz kontroli jakości, w tym badania orientacji krystalicznej i procesy trawienia. Prowadzone są badania nad zwiększeniem odporności łopatek na pęcznienie, zmęczenie oraz korozję. Niezmiennie od wielu lat w kręgu

zainteresowań są monokrystaliczne łopatki z nadstopów niklu. Żarowytrzymałe stopy na bazie niklu wykazują dobrą kombinację wytrzymałości mechanicznej i odporności na degradację powierzchni pod wpływem aktywnego chemicznie środowiska w podwyższonej temperaturze. Rozwój tych stopów pozwolił na zdecydowane podniesienie temperatury ich pracy. Monokrystaliczne nadstopy niklu, znalazły zastosowanie w odlewach łopatek silników lotniczych dzięki swojej wyjątkowej makro i mikrostrukturze oraz stabilności mikrostruktury w temperaturach bliskich temperaturze topnienia stopu. Te właściwości są kształtowane głównie podczas procesu krystalizacji kierunkowej i zależą od składu chemicznego stopów oraz parametrów procesu krystalizacji. Niejednorodności orientacji krystalicznej i mikrostruktury łopatek są bardzo ważne z punktu widzenia ich właściwości wytrzymałościowych. Podczas eksploatacji łopatek, narażonych na duże siły odśrodkowe, niejednorodności te powodują lokalne koncentracje naprężeń, co zwiększa ryzyko zarodkowania i rozwoju pęknięć. Uważam, że problematyka naukowa podjęta w opiniowanej rozprawie doktorskiej Pana Bartosza Terleckiego jest aktualna, a patrząc z punktu widzenia technologii wytwarzania monokrystalicznych łopatek silników odrzutowych oraz metod ich badania istotna. W oparciu o studia literaturowe i wyniki własnych badań doświadczalnych sformułowano tezę pracy: „Dodatkowe składniki stopowe Re, W obecne w nadstopach CMSX-4 drugiej generacji istotnie zmieniają niejednorodność orientacji krystalicznej i struktury zamków łopatek monokrystalicznych w porównaniu do zamków łopatek nadstopów CMSX-6 pierwszej generacji. Porównanie zamków monokrystalicznych łopatek tych dwóch nadstopów pozwoli na określenie tendencji zmian niejednorodności krystalicznej i struktury w zamkach monokrystalicznych łopatek następnych, kolejnych generacji, w których zawartość Re i W jest zwiększana.” i postawiono główny cel, jakim była charakterystyka porównawcza przestrzennych rozkładów składowych orientacji krystalicznej oraz parametru sieci fazy  $\gamma'$  w zamkach monokrystalicznych łopatek nadstopów CMSX-6, oraz nadstopu CMSX-4 wzbogaconego o te pierwiastki. Praca ma zarówno charakter badań podstawowych jak i stosowanych.

### **3. Ocena merytoryczna pracy**

Oceniając pracę od strony merytorycznej warto podkreślić, że zaplanowane eksperymenty oraz interpretacja wyników wykonane są starannie i jako całość stanowią dobre opracowanie

tematu niejednorodności orientacji i struktury w badanych monokrystalicznych odlewach CMSX-4 i CMSX-6. Wytworzone do badań łopatki zostały wykonane metodą Bridgmana przy dwóch różnych prędkościach wyciągania 1 i 3 mm/min. Dobrze dobrano zestaw technik pomiarowych i osiągnięto wysokiej jakości wyniki. Badania wykonano w sposób przemyślany i wykorzystano odpowiedni zestaw badań w celu charakterystyki badanych materiałów. Moje uznanie budzie opis metodologii badań oraz jakość uzyskanych wyników badań. Niewątpliwie każdy kto mierzył się z preparatyką do badań tego typu materiałów doceni poziom osiągniętych wyników. Rozprawę doktorską Pana mgra inż. Bartosza Terleckiego oceniam pozytywnie. Za największe osiągnięcie Autora uważam taki dobór metodologii oraz technik badawczych, który pozwolił mu na opis złożonej mikrostruktury nadstopów CSMX-6 i CMSX-4, niejednorodności orientacyjnej zamków monokrystalicznych łopatek wykonanych z ww. stopów oraz na charakterystykę obszarów występowania granic niskiego kąta.

Podczas jej uważnej lektury nasuwają się jednak pewne spostrzeżenia natury polemicznej i krytycznej oraz uwagi szczegółowe (natury edycyjnej oraz inne drobne uwagi), które wyrażam poniżej:

#### **Uwagi ogólne i dyskusyjne:**

1. Moim zdaniem teza rozprawy jest nieprecyzyjna i nie jest oczywiste, że tak jest nawet przy zaprezentowaniu tak licznych wyników badań. Czy w przypadku zmian kilku pierwiastków stopowych można mówić o badaniu wpływu konkretnego pierwiastka czy też składu chemicznego? Jest to pewien efekt synergiczny. Re i W dodano w większej ilości do stopu CMX-4, ale jednocześnie obniżono zawartości innych pierwiastków np. Mo.
2. Czy badaniom poddano po dwie łopatki z każdego stopu wyciągane przy dwóch różnych prędkościach, co daje jedną łopatkę z danego składu chemicznego wytworzoną w danych warunkach?
3. Do pełnego obrazu brakuje m. in. temperatur likwidus i solidus badanych stopów, jak również temperatury solvus fazy  $\gamma'$ . Różnice mają bowiem wpływ na proces krystalizacji jak i na wielkość wydzieleni.
4. Dlaczego w obszarze pomiędzy LAB parametr sieci jest niższy? Prezentowana próba wyjaśnienia segregacją składników stopowych na podstawie zamieszczonych wyników jest nieprzekonująca, badano bowiem próbki w kierunku x a nie w kierunku z (wzrostu).

W przypadku segregacji mówimy o obszarze kilkudziesięciu mikrometrów. Średnica wiązki pierwotnej (0,8 mm) może powodować zakłócenia, ponieważ informacja krystalograficzna pochodzi od kilku dendrytów, co prowadzi do rozmycia lub poszerzenia refleksów.

5. Brakuje szczegółowego opisu metodologii badań EBSD oraz EDS.
6. Pokazany na stronie 175 rys. 137 - schemat rozkładu pierwiastków stopowych w stopie CMX-6 - budzi moją wątpliwość, w szczególności w odniesieniu do Ti. Jak się złoży cyfrowo mapy EDS to widać, że Ti jest ulokowany raczej w wydzieleniach a nie w osnowie.
7. Dlaczego zawartość Ti określona przy pomocy EDS w TEM (rys. 136 strona 174) jest tak niska w porównaniu do nominalnej zawartości Ti w stopie CMX-4? Czy w związku z tym wiarygodny jest wyniki o segregacji Ti do fazy gamma?
8. W jaki sposób można uzasadnić fakt, że przy większej prędkości wyciągania stwierdzono wydzielenia fazy  $\gamma'$  o szerszym zakresie wielkości, przykładowo dla stopu CMX-6 przy  $V_t=1$  mm/ min było to od 0,12 do 0,38  $\mu\text{m}$ , a przy  $V_t=3$  mm/ min było to od 0,11 do 0,42  $\mu\text{m}$ ? Przeczy to stwierdzeniu ze strony 17 rozprawy „Zwiększenie szybkości wyciągania zmniejsza odległość między pierwotnymi i wtórnymi ramionami dendrytu, skalę eutektyki  $\gamma/\gamma'$ , charakterystycznych wymiarów fazy  $\gamma$  oraz  $\gamma'$ . Zmniejsza to mikrosegregację dendrytyczną oraz czas i koszt dalszej obróbki cieplnej”.
9. Na stronie 189 w rozdziale dyskusja wyników znajduje się zdanie „Porównanie składu chemicznego CMSX-6 i CMSX-4 umożliwia zrozumienie, jakie pierwiastki kluczowe przyczyniają się do ich właściwości. Dodatkowo defekty w strukturze krystalicznej, takie jak dyslokacje i wtrącenia, wpływają na wytrzymałość i trwałość materiału. Porównanie stopnia zdefektowania nadstopów CMSX-6 i CMSX-4 pozwala na ocenę ich odporności na zmęczenie i korozję.” Nie badano właściwości mechanicznych i odporności korozyjnej.
10. Na stronie 199 znajduje się stwierdzenie „... Każda wibracja lub odchylenie osi pieca od pionu może powodować lokalne lub globalne wygięcia. Dlatego należy zabezpieczyć proces przed ewentualnymi wibracjami i skorygować oś odlewu z osią pieca. Ponadto, łopatki otrzymane przy większej prędkości rzędu 6-10 mm/min, a więc z cieńszymi obszarami rdzenia i trzonu, są bardziej narażone na tego typu defekty. Oznacza to, że system odlewniczy Bridgmana stosowany w tym przypadku musi być odpowiednio

zabezpieczony”. To wygląda jak fragment nie z tej pracy, nie jest bowiem podparty wynikami zamieszczonymi w rozprawie.

11. Moim zdaniem nie powinno się używać stwierdzenia „Na granicach niskiego kąta występują mniejsze wartości składowej  $\alpha$  dezorientacji dendrytów ...” tylko w obszarze granicy niskiego kąta.

#### **Uwagi edycyjne:**

1. W rozprawie w odniesieniu do mikrostruktury używane są naprzemiennie struktura i mikrostruktura. Należało wybrać jeden sposób nazewnictwa.
2. Na stronie 169 nieprecyzyjnie opisano proces przygotowania lameli przy użyciu FIB. Nie wycina się nad i pod, tylko przed i za paskiem platyny,
3. Tabele na stronach 178-180 są nieczytelne.
4. Strona 69 ...” Następnie krążek poddano obustronnemu ścinaniu na grinderze ...”. Powinno być ścienianiu.
5. Na stronach 27 oraz 93 znajdują się błędne odwołania do rysunków.
6. Na stronie 193 znajduje się błędne odwołanie do Tabeli 19, powinno być do Tabeli 18.
7. Strona 66 w składzie odczynnika trawiącego nie zgadza się jego skład „Trawienie przeprowadzono w roztworze zawierającym 85% kwasu fosforowego, 65% kwasu azotowego oraz 95-97% kwasu siarkowego, ...”.
8. Rysunek 123 na stronie 155 byłby czytelniejszy, gdyby wprowadzono opisy rysunków a,b, c itd.
9. Markery na zdjęciach SEM są nieczytelne np. rys. 116 strona 145, co utrudnia weryfikację wyników.
10. W pracy znaleziono liczne literówki i błędy stylistyczne np. na stronie 26, 29, 32, 35, 47, 51, 79, 81, 104, 113, 132, 133, 134, 135, 136, 138, 139, 148, 152, 153, 182, 202 oraz inne nie wymienione.

Wszystkie przedstawione uwagi mają charakter uzupełniający i dyskusyjny oraz nie wpływają na obiór pracy jako całości. Moim zdaniem Autor poradził sobie z rozwiązaniem sformułowanego problemu badawczego określenia niejednorodności orientacji i mikrostruktury w badanych monokrystalicznych odlewach CMSX-4 i CMSX-6.

#### 4. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa jest dobrze ułożona w obecnym stanie wiedzy, została wykonana i napisana na odpowiednim poziomie naukowym i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Niewątpliwie Autor posiada szeroką wiedzę teoretyczną i praktyczną w zakresie metod dyfrakcyjnych oraz charakteryzowania materiałów, a uzyskane wyniki, ich opis i dyskusja są dowodem na to, że potrafi samodzielnie prowadzić badania naukowe.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Bartosza Terleckiego pt.: „Niejednorodność orientacji i struktury w monokrystalicznych odlewach CMSX-4 i CMSX-6” stwierdzam, że spełnia ona wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim zawarte w stosownej ustawie oraz wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Śląskiego o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Piotr Bała

Wpłynęło 17.08.2024 Juba