

Wrocław, 05.02.2024r.

Dr hab. inż. Tomasz Kurzynowski, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny
Katedra Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji Produkcji
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Anny Pytel

pod tytułem:

„Wpływ obróbki mechanicznej i morfologii wydzieleni węglików w żarowytrzymałych stopach odlewniczych ŻS6U-WI na własności zmęczeniowe łopatek I Stopnia Turbiny Sprężarki stosowanych w produkcji lotniczej.”

Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, dra hab. inż. Macieja Motyki, prof. PRz. Nr RM-530-20-01/2023 w sprawie powołania na recenzenta pracy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Pytel.

1. Zasadność podjęcia tematu

Przemysł lotniczy aktualnie rozwija się bardzo dynamicznie, co jest związane z coraz to większą dostępnością połączeń lotniczych a także dużą mobilnością ludzi na całym świecie. Skutkuje to rosnącym zapotrzebowaniem na statki powietrzne oraz powiększającą się branżą ich serwisowania. Dlatego też bardzo ważne jest ciągłe doskonalenie procesów produkcyjnych jak i też procesów wytwórczych poszczególnych części lub zespołów w tej branży a także samej jakości i trwałości tych części, szczególnie tych krytycznych z punktu widzenia bezpieczeństwa.

Doktorantka w swojej pracy skupiła się na łopatkach I Stopnia Turbiny Sprężarki w silnikach turbowentylatorowych. Ma to swoje właściwe uzasadnienie, biorąc pod uwagę ich narażenie na silne korozyjne środowisko gazów spalinowych oraz degradacyjne skutki długotrwałego zmęczenia cieplnego. Gorące części silników lotniczych wykonane są z nadstopów na bazie niklu i pracują w niezwykle trudnych warunkach. Będące przedmiotem badań łopatki wytwarzane są najczęściej metodą

odlewania, którego parametry mają duży wpływ na właściwości zmęczeniowe produktu końcowego, a parametry procesu odlewania mają istotny wpływ na mikrostrukturę, czyli morfologię składników fazowych. **Dlatego też postawiony cel pracy „opracowanie parametrów technologii wytwarzania gotowych łopatek ze stopu ŻS6U-WI z zachowaniem wysokich standardów jakościowych zapewniających bezpieczną ich eksploatację w silniku lotniczym” uważam za właściwy i bardzo aktualny.**

Zakres pracy został poprawnie dobrany i obejmował, zgodnie z przedstawioną w pracy metodyką, 4 etapy badawcze:

1. **Badanie procesu wytwarzania półwyrobu**, gdzie doktorantka wykonała analizy składu chemicznego poszczególnych wytopów, badania zmęczeniowe przy zmiennych parametrach odlewania, obserwacje mikrostruktury w celu identyfikacji składników fazowych, badanie makrostruktury i analizę cieplną stopu w stanie dostawy.
2. **Badanie procesów specjalnych** (obróbka cieplna – przesycanie, obróbka cieplno-chemiczna – aluminiowanie i renoaluminowanie). Doktorantka przeprowadziła następujące badania: badania właściwości mechanicznych oraz żarowytrzymałości, badania fraktograficzne przetomów, badania mikroskopowe po obróbce cieplnej z określeniem udziału objętościowego fazy γ' , badanie składu chemicznego wydzielen, badania jakościowe i ilościowe warstwy aluminidkowej na gotowym detalu oraz badania po renoaluminowaniu.
3. **Badanie procesu obróbki strumieniowo-ściernej (kulowanie)**, gdzie autorka wykonała badania zmęczeniowe gotowego wyrobu, badanie mikrostruktury warstwy wierzchniej oraz badania dyfrakcyjne.
4. **Badania dot. powierzchniowej obróbki wykańczającej (obróbka mechaniczna)**, która polegała na badaniu mikrotwardości, badaniu metalograficznym warstwy wierzchniej oraz badaniom dyfrakcyjnym.

Znaczenie naukowe i praktyczne wyników ocenianej pracy jest znaczne. Procesy technologiczne i zjawiska materiałowe rozpatrywane w pracy należą do bardzo skomplikowanych procesów wytwarzania obciążonych znaczną zmiennością. Dlatego niezmiernie istotne jest kontrolowanie i umiejętność wpływania na parametry technologiczne podczas wytwarzania łopatek które krytycznie determinują wytrzymałość zmęczeniową oraz jakość końcowego wyrobu.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anny Pytel liczy 158 stron i składa się z streszczenia w języku polskim i angielskim, 5 sekcji: I Wprowadzenie, II Studium literatury, IIa Metodyka, III Badania własne, IV Wnioski i podsumowanie i V Bibliografia w liczbie 98 pozycji. Struktura pracy od strony merytorycznej jest właściwa i logiczna, jednak spis treści nieco odbiega od przyjętych standardów, ponieważ doktorantka podzieliła pracę na Etapy a dopiero w nich zawarła merytoryczne nazwy rozdziałów lub podrozdziałów.

ETAP I „WPROWADZENIE” to wstęp gdzie autorka przedstawia ogólnie zasadność podjęcia tematyki i badań przeprowadzonych w rozprawie.

ETAP II „STUDIUM LITERATURY”, gdzie doktorantka charakteryzuje budowę i rodzaje łopatek turbiny sprężarki, ich zastosowanie, różne technologie wytwarzania a także opisuje problemy technologiczne i eksploatacyjne oraz przedstawia 5cjo etapową procedurę oceny problemu na eksploatację części.

ETAP III „BADANIA WŁASNE” stanowi najobszerniejszy fragment niniejszej rozprawy, który dotyczy analizy procesu odlewania łopatek, zastosowania procesów specjalnych w technologii wytwarzania łopatek, obróbkę strumieniowo-ścierną oraz mechaniczną.

ETAP IV „WNIOSKI I PODSUMOWANIE” gdzie doktorantka podsumowała trzy zadania badawcze które doprowadziły do realizacji celu rozprawy.

ETAP V „BIBLIOGRAFIA” składająca się z 98 pozycji literaturowych i 9 norm.

3. Ocena poziomu naukowego rozprawy

Niniejsza rozprawa ma typowo doświadczalny oraz praktyczny (stosowany) charakter. W pracy mgr inż. Anna Pytel udowodniła, że posiada rozległą i ugruntowaną wiedzę nie tylko z zakresu inżynierii materiałowej, w której napisała niniejszą dysertację, ale także z inżynierii mechanicznej i wchodzącej w nią dawnej inżynierii produkcji. Daje to obraz interdyscyplinarnej pracy, której jednak główny nacisk właściwie położony jest na obszar inżynierii materiałowej. Jest to spójne z postawioną tezą ze strony 42 rozprawy „parametry procesów produkcyjnych w technologii wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia z odlewniczego nadstopu niklu ŻS6U-WI determinują wytrzymałość zmęczeniową oraz jakość finalnego wyrobu gwarantującą prawidłową i bezpieczną ich pracę w warunkach cyklicznych obciążeń cieplnych i mechanicznych. Możliwe jest zatem, zidentyfikowanie i ostateczne wyeliminowanie krytycznych, dla jakości łopatek, wszelkich odchyłek materiałowych i konstrukcyjnych poprzez zastosowanie nowoopracowanych procedur naprawczych na etapie kontroli i analizy cyklu produkcyjnego w systemie: I etap – Odlewanie, II etap – Procesy Specjalne, III etap – obróbka mechaniczna, IV etap – kulowanie, zapewniając uzyskanie produktu spełniającego wysokie wymagania jakościowe odbiorców części stosowanych w produkcji silników lotniczych”. Nie jest do końca zrozumiałe jednak, dlaczego inna teza postawiona jest na stronie 4, „możliwe jest wytwarzanie łopatek pierwszego stopnia turbiny o prognozowanych własnościach zmęczeniowych, przy zastosowaniu odpowiednich parametrów procesu obróbki mechanicznej i poprzez kształtowanie odpowiedniej morfologii wydzieleni węglików w mikrostrukturze łopatek wytwarzanych z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI”

Pomimo powyższej rozbieżności, doktorantka potrafi prawidłowo ocenić zdefiniowane przez siebie wyzwanie oraz właściwie sformułować własne cele badawcze, do realizacji których stosuje, według mojej opinii, bardzo dobrze sformułowany plan badań eksperymentalnych (strona 44 rozprawy). Do jego realizacji wykorzystuje zaawansowane narzędzia badawcze i pomiarowe w skali mikro i makro, metody pomiarów właściwości wytrzymałościowych, metalograficznych, termicznych i metrologicznych. Biegłe posługuje się zaawansowaną aparaturą naukową, m.in. skaningową mikroskopią elektronową czy dyfraktometrią XRD. Wykazała też, że właściwie potrafi zinterpretować otrzymane wyniki badań w odniesieniu do obecnego stanu wiedzy.

W pracy, zgodnie z jej podziałem, wyróżnia 5 części (etapów): Wprowadzenie, studium literatury i metodykę, badania własne, wnioski i podsumowanie oraz bibliografię. Według recenzenta najważniejszymi jednak są części związane z metodyką, szeroko opisanymi badaniami własnymi oraz wnioskami i podsumowaniem.

Doktorantka w części literaturowej dokonuje przeglądu obecnego stanu wiedzy, gdzie rozpoczyna od opisu silników turbowentylatorowych, ich konstrukcji na przykładzie PZL-10W wykorzystywanego w śmigłowcach „Sokół”. Następnie skupia się na budowie i rodzajach łopatek Turbiny Sprężarki gdzie definiuje obszary krytyczne, jakim jest połączenie zamka z piórem. W dalszej części wymienia występujące obciążenia mechaniczne oddziałujące na łopatki, naprężenia czy też przyczyny drgań łopatek. W kolejnym podpunkcie skupia się na materiałach wykorzystywanych do wytwarzania łopatek, gdzie szeroko i bardzo szczegółowo opisuje nadstopy na osnowie niklu. W ramach tego podrozdziału charakteryzuje materiał ŻS6U-WI, będący przedmiotem badań w niniejszej rozprawie. W dalszej części przechodzi do technologii wytwarzania łopatek, dzieląc ten proces na poszczególne etapy (odlewanie precyzyjne, obróbka cieplno-chemiczna, obróbka strumieniowo-ścierna, obróbka wykańczająca). Następnie opisuje problemy technologiczne i eksploatacyjne, gdzie skupia się głównie na wytrzymałości zmęczeniowej i czynnikach na nią wpływających. W końcowej części tego rozdziału dokonuje podsumowania oraz stawia tezę pracy, przytoczoną już na początku tego rozdziału recenzji.

Kolejna część pracy to metodyka badań, gdzie doktorantka wyszczególniła czynności badawcze które podejmuje w swoich badaniach przy poszczególnych 4 etapach technologicznych (odlewanie, obróbka cieplno-chemiczna, obróbka strumieniowo-ścierna oraz obróbka wykańczająca). Szczególnie wartościowy dla pracy jest rys. 1 w rozdziale IIa, przedstawiający całościowo program badawczy pracy i orientujący czytelnika w zakresie oraz liczbie prowadzonych badań. Następnie Doktorantka charakteryzuje materiał do badań jakim jest już wspomniany stop odlewniczy ŻS6U-WI oraz szczegółowo, wręcz w mojej opinii wzorcowo, charakteryzuje warsztat badawczy którym posługuje się w realizacji pracy.

Najobszerniejsza i najbardziej istotna część rozprawy to pkt. III. Badania własne, gdzie na 86 stronach Doktorantka wykonała, zgodnie z przyjętą we wcześniejszym rozdziale metodyką badań, szereg doświadczeń i eksperymentów związanych głównie z badaniami materiałowymi i wynikającymi z nich badaniami właściwości mechanicznych:

- Zidentyfikowała i sklasyfikowała 3 typy pęknięć po próbach zmęczeniowych: pęknięcie zewnętrzne (powierzchniowe), do głębokości 20um, pęknięcie wewnętrzne (jamy skurczowe) oraz pęknięcie inicjowane naprężeniami zewnętrznymi generowanymi w czasie obróbki mechanicznej.
- Określiła wpływ pierwiastków mających wysokie powinowactwo z węglem na właściwości zmęczeniowe badanego materiału na podstawie danych z odlewni w latach 2015-2018. Były to molibden, tytan, wolfram i niob a także % udział chromu.
- Przeanalizowała wpływ temperatury zalewania formy na właściwości zmęczeniowe determinowane wydzielającymi się w wyższej temperaturze węglkami.
- Dokonała analizy wpływu temperatury na wielkość ziarna, która ma wpływ na właściwości zmęczeniowe.
- Przeanalizowała wpływ dodatku modyfikatora na rozmiar ziarna badanego stopu.

Powyższe cząstkowe osiągnięcia doprowadziły do zmian wprowadzonych w karcie Procesu Wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia, co należy wyraźnie podkreślić jako znaczące osiągnięcie rozprawy doktorskiej.

- Określiła wpływ obróbki cieplnej łopatek na ich właściwości mechaniczne oraz żarowytrzymałość.
- Określiła również wpływ obróbki cieplnej na mikrostrukturę oraz na udział objętościowy poszczególnych składników fazowych.
- Zweryfikowała wpływ procesu aluminiowania na żarowytrzymałość i odporność na korozję. Badania przeprowadziła w 150 godzinnym teście na silniku technologicznym w temperaturze pracy silnika oraz środowisku gazów utleniających.
- Zweryfikowała również wpływ dodatku w postaci renu do procesu aluminiowania na właściwości zmęczeniowe, które nieznacznie się obniżyły, co było powodem odrzucenia tego dodatku do procesu.
- Określiła wpływ obróbki strumieniowo-ściernej (kulowanie) na wytrzymałość zmęczeniową, mikrostrukturę oraz naprężenia wewnętrzne.
- Określiła wpływ obróbki wykończeniowej na jakość powierzchni, mikrostrukturę warstwy wierzchniej, naprężeń wewnętrznych i twardości.

Ostatnią częścią rozprawy, oprócz Bibliografii, jest rozdział Wnioski i podsumowanie. Doktorantka skrótowo, ale treściwie podsumowała 3 zadania badawcze, które doprowadziły ją do realizacji celu pracy. Zadania te to:

- Ocena wpływu parametrów procesu technologicznego na własności wytwarzanych półwyrobów metodą odlewania precyzyjnego.
- Ocena wpływu parametrów obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej na jakość łopatek.
- Opracowanie warunków procesów obróbki strumieniowo-ściernej oraz powierzchniowej obróbki wykańczającej.

Szczególnie wartościową jest tabela 53 na stronie 148 rozprawy, gdzie Doktorantka scharakteryzowała wpływ parametrów wytwarzania na jakość łopatek Turbiny Sprężarki wytwarzanych ze stopu ŻS6U-WI z uwzględnieniem wszystkich analizowanych procesów (odlewanie, procesy specjalne, kulowanie, obróbka wykańczająca).

4. Uwagi redakcyjne

Pracę charakteryzuje bardzo wysoka jakość edytorska, językowa czy też interpunkcyjna. Niemniej jednak Doktorantka popełniła kilka nielicznych błędów edytorskich:

- Str. 64 – 67 mają inne formatowanie tekstu – podrozdział 3.2.1. podobnie jest na stronach 84, 86.
- Rys. 65 podpisany jest na górze, a powinien być podpisany na dole. Chyba, że powinna to być tabela?
- Podrozdział 3.2 nie posiada żadnej treści, od razu zaczyna się pod-pod rozdział 3.2.1.
- Podobnie podrozdział 4.4.
- Rozdział 3 i 4 nie mają treści, rozpoczynają się od podrozdziału.

- W studium Literatury brakuje pkt. 2. Ta część zaczyna się od razu od podrozdziału 2.1.
- Podpisy rysunków nie są ujednoczone, np. rys. 66 ma mniejszą czcionkę niż rys 67.
- Rys. 29 – liczba łopatek, nie ilość.
- Numeracja rysunków i tabel może być myląca, ponieważ w pracy jest kilka rysunków np. nr 1 przypisanych do danego rozdziału. Raczej numeracja powinna jednoznacznie identyfikować dany rysunek lub tabelę w całej pracy a nie tylko w poszczególnym rozdziale.

5. Pytania i uwagi krytyczne

- Doktorantka w pracy używa stwierdzeń „proces produkcyjny”, „cykl produkcyjny” mylnie definiując w ten sposób proces wytwarzania. Produkcja jest znacznie szerszym pojęciem od wytwarzania, które obejmuje zakupy, logistykę, transport zewnętrzny i wewnętrzny, magazynowanie itp. Natomiast wytwarzanie to wyłącznie czynności bezpośrednio związane z daną częścią, w większości które dodają tzw. „wartości dodanej” do wytwarzanego elementu (zmienia jakość lub powiększa ilość dóbr, czyli ma na celu uzyskanie użytecznych właściwości przez zmianę formy, wielkości, właściwości fizyko-chemicznych, czyli przekształcenia materii i energii). Uogólniając wytwarzanie zazwyczaj mieści się na „hali maszyn” a produkcja jest znacznie szerszym pojęciem.
- Doktorantka używa również słowa własność które raczej mówi o posiadaniu niż o parametrze. Bardziej odpowiednim wydaje się słowo właściwość.
- Czy zdefiniowane na stronie 61 pęknięcia nie powinny być nazwane wadami powierzchniowo-objętościowymi? Wykruszenie węgla samo w sobie nie jest pęknięciem a może być przyczynkiem do jego powstania (karb?).
- Czy trzeci typ pęknięć powodowany jest na pewno naprężeniami zewnętrznymi, czy tylko czynnikiem zewnętrznym jakim jest obróbka która „uwalnia” naprężenia wewnętrzne?
- Na stronie 63 Doktorantka pisze, cytując „zastosowanie badań nieniszczących NDT, np. metoda penetracyjna czy badań ultradźwiękami nie zapewnia pełnej, rzetelnej identyfikacji wszystkich typów pęknięć, które mogą występować w analizowanych łopatkach”. Czy Doktorantka rozważała inne metody NDT które taką identyfikację umożliwią? Jednocześnie Doktorantka w tabeli 3 (strona 64) pisze, że drugi typ pęknięcia (wewnętrzne) jest w stanie zidentyfikować metodą penetracyjną a pierwszy typ pęknięć (powierzchniowe) identyfikuje z wykorzystaniem badań metalograficznych. Prośba o komentarz.
- Czym różnił się w tabeli 8 odlew nr 1 i 2 ?
- Tab. 14. Proszę o komentarz dotyczący zakresu temperatur zalewania dla odlewu A i B (trzy wartości całkowite temperatur z matematycznego punktu widzenia są wspólne dla A i B) w odniesieniu do rys. 68 gdzie podano wielkość ziarna różniącą się dwukrotnie.
- Czy doktorantka opracowywała proces obróbki strumieniowo-ściernej (kulowanie), czy też badania które przeprowadziła dotyczyły „standardowego” procesu?
- To samo pytanie dotyczy obróbki mechanicznej z pkt. 4 metodyki.
- Na stronie 99 w podrozdziale 4.1 Doktorantka pisze, że na właściwości mechaniczne odlewów ma wpływ, poza parametrami mikrostruktury stopu, również udział porowatości. Czy mierzyła Pani tę porowatość? Jaki jest jej wpływ i jaki jest graniczny udział porów aby móc uznać odlew za wadliwy/właściwy?

- W pracy znalazłem 2 różniące się tezy rozprawy na stronie 4 oraz 42. Która z tych tez jest tą właściwą? Dodam, że obie tezy są zdefiniowane poprawnie dla tej rozprawy.

6. Wniosek końcowy

Tematyka poruszana w doktoracie dotyczy aktualnego wyzwania materiałowego i technologicznego ważnego zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że praca realizowana jest w programie Doktorat Wdrożeniowy, co stanowi o aplikacyjnym charakterze badań. Doktorantka przedstawiła swoje wyniki w sposób głównie tabelaryczny, co według mnie stanowi bardzo dużą zaletę tej pracy. Dodatkowo należy podkreślić dużą (ale nie przesadzoną) liczbę zdjęć mikroskopowych, co tylko podkreśla kompetencje Doktorantki w obsłudze zaawansowanych narzędzi pomiarowych. Praktycznym efektem niniejszej pracy naukowej było wdrożenie jej wyników w firmie PWR w postaci zmian wprowadzonych w karcie Procesu Wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia. Przedstawione w recenzji uwagi redakcyjne i krytyczne nie wpływają na moją pozytywną ocenę pracy.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anny Pytel pt. „*Wpływ obróbki mechanicznej i morfologii wydzieleni węglików w żarowytrzymałych stopach odlewniczych ŻS6U-WI na własności zmęczeniowe łopatek I Stopnia Turbiny Sprężarki stosowanych w produkcji lotniczej*” spełnia w stopniu ponadprzeciętnym wymagania ustawy – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2022, poz. 574 z póź. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony. Jednocześnie, biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

