

Katowice, 15 stycznia 2024

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. ARTURA WOJTYCZKI

pt. „Opracowanie technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego satelitarnych kół zębatach przekładni lotniczej silnika FDGS, wykonanych ze stali Pyrowear53 i pracujących w warunkach długotrwałych i cyklicznie zmiennych obciążeń eksploatacyjnych”

Uwagi formalne

Opinię niniejszą wykonałam na podstawie przesłanego do mnie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Macieja Motyki, prof. PRz. z dnia 15.11.2023 roku.

Ocena istotności problemu naukowego rozprawy

Zasadniczym problemem podjętym w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Artura Wojtyczki jest opracowanie parametrów technologicznych procesu niskociśnieniowego nawęglania próżniowego LPC połączonego z wysokociśnieniowym hartowaniem gazowym HPGQ oraz badania i analiza ich wpływu na skład fazowy, właściwości, mikrostrukturę i morfologię składników mikrostruktury kół zębatach wytwarzanych ze stali Pyrowear 53. Ponadto Autor dokonał porównania jak parametry procesowe technologii niskociśnieniowego nawęglania próżniowego LPC połączonego z wysokociśnieniowym hartowaniem gazowym HPGQ wpływają na wyżej wymienione elementy badanej stali w porównaniu do tradycyjnego procesu hartowania kół zębatach w oleju.

Zagadnienia rozwijania technologii, jakie związane są z produkcją, przetwarzaniem, obróbką a także wdrażaniem do praktyki przemysłowej ich rezultatów w obszarze materiałowym, stanowią niezmiennie czynnik determinujący podwyższanie parametrów pracy oraz niezawodności nowoczesnych silników lotniczych i podzespołów konstrukcyjnych. Jednym

z takich podzespołów jest element przekładni planetarnej w postaci kół zębatach. Stanowią one newralgiczny komponent, w tym szczególnie dla nowej generacji silników rodziny PurePowerPW1000G, w których zastosowano innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne silnika turbowentylatorowego, gdzie zmieniono system redukcji obrotów wentylatora. W takim rozwiązaniu przekładnia planetarna składa się z dwóch zestawów kół zębatach złożonych z pierścienia, satelity i planetarium. Taka przekładnia umożliwia przenoszenie większych momentów obrotowych przy mniejszych wymiarach a tym samym możliwe jest zwiększanie wydajności silnika, co przekłada się na zmniejszenie zużycia paliwa. Tradycyjne technologie obróbki cieplnej kół zębatach polegały i polegają nadal głównie na procesie próżniowego nawęglania niskociśnieniowego zwykle w atmosferze węglowodorów nienasyconych, i hartowania, według kilku możliwych wariantów, z zastosowaniem różnych ośrodków chłodzących, oraz następującego po nim odpuszczania. Oczywiście, dzięki rozwojowi technologii, w tym rozwojowi konstrukcji pieców próżniowych jest to rozwiązanie technologicznie opanowane i pozwala na uzyskiwanie powtarzalnych i zgodnych z wymaganiami norm przemysłu lotniczego dla uzyskania jakościowo odpowiednich wyrobów o zaprojektowanym, i wymaganym zestawie właściwości. W tym obszarze nowym rozwiązaniem, którego podwaliny sięgają już lat 80-tych XX wieku, opracowanym na potrzeby podwyższenia właściwości mechanicznych i ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko jest technologia wysokociśnieniowego hartowania gazowego.

W obszarze tym zatem, zaistniała możliwość rozwoju technologii obróbki cieplno – chemicznej kół zębatach, jako między innymi komponentów przekładni planetarnej silników lotniczych. Z racji zarówno technologicznych możliwości jak i chęci zwiększania efektywności swoich procesów a także dostosowywania się do coraz to wyższych wymogów jakościowych z rozwoju wspomnianej technologii, jej badaniu oraz wdrożeniu skorzystano w zakładzie badawczym Pratt & Whitney Rzeszów Polska. W odniesieniu do możliwych korzyści wynikających z poniesionych nakładów, opracowanie technologii opartej na połączeniu nawęglania próżniowego i wysokociśnieniowego hartowania gazowego na przykładzie kół zębatach przekładni planetarnej silnika lotniczego o zwiększonej wydajności, stanowi ciekawe rozwiązanie technologiczne nakierowane na konkretny produkt o zaprojektowanym zestawie właściwości przy założeniu jego wytwarzania ze znanego gatunku stali. W tym kontekście wybór tematyki pracy doktorskiej Pana mgr inż. Artura Wojtyczki jest w pełni uzasadniony a przedstawiona do oceny rozprawa doktorska wpisuje się swoją tematyką w interesujące i bardzo aktualne obszary badań aplikacyjnych nauk technicznych w obszarze inżynierii materiałowej.

Przedłożone do oceny opracowanie zostało przygotowane w formie oprawionego wydruku komputerowego formatu A4 o objętości 171 stron. Struktura rozprawy nie odbiega od przyjętych standardów dla tego rodzaju opracowań. Doktorant podzielił pracę na dwie zasadnicze części. Pierwsza z nich, zatytułowana „Studium literatury”, zajmuje 40 stron. Opracowanie literaturowe podzielone jest na 10 podrozdziałów. Wprowadzają one czytelnika w tematykę zagadnienia i zarysowują problem technologiczny. Część literaturowa została niejako podsumowana w rozdziale 4 zatytułowanym „Podsumowanie stanu zagadnienia – teza, cel i zakres pracy” jednak stanowi ona tzw. technologiczne uzasadnienie celowości zastosowania wysokociśnieniowego hartowania gazowego stali Pyrowear 53. Literatura przywołana w pracy jest adekwatna i aktualna. W spisie literatury Doktorant podaje 126 pozycji krajowych i

zagranicznych, do których odwołuje się w swojej rozprawie. W tej grupie nie znalazły się prace autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, choć w literaturze dostępna jest pozycja autorstwa Doktoranta zawierająca wybrane wyniki badań stali Pyrowear53¹ natomiast znalazły się trzy pozycje współautorstwa Promotora i Promotora pomocniczego rozprawy. Część z pozycji to poradniki, normy czy też specyfikacje urządzeń. Kilka pozycji nie zawiera wszystkich właściwych danych bądź też jest ich zupełnie pozbawiona (na przykład rozprawy doktorskie czy pozycja 126).

Druga część rozprawy, którą należy zaliczyć do części eksperymentalnej, przedstawiona została na 110 stronach, co stanowi większą część objętości pracy. Tę część pracy otwiera wspomniany już rozdział 4 - „Podsumowanie stanu zagadnienia – teza, cel i zakres pracy”, a następnie rozdział 5 - „Badania własne”, zawierający 1 podrozdział o materiale do badań. Następnie Autor definiuje kolejny rozdział o numerze 6 jako „Metodykę badań” zawierający dwa podrozdziały. W mojej opinii Doktorant niefortunnie pozostawił tego typu nazwę rozdziału, gdyż oba podrozdziały 6.1 i 6.2. są opisem technologii nawęglania próżniowego i technologii obróbki cieplnej po nawęglaniu. Kolejny 7 rozdział pracy to znów „Badania własne”. W tym to rozdziale Autor przedstawia kolejno prowadzone badania wraz z ich metodyką, przywołując standardy i wytyczne techniczne. Zatem jak można zauważyć Autor rozprawy mylnie lub z pośpiechu przypisał tę samą nazwę dwóm rozdziałom. Przedostatni rozdział pracy, to rozdział 8 - „Wyniki badań i ich analiza”, w którym niekoniecznie logicznie następują po sobie kolejne podrozdziały. Bowiem podrozdziałów o tej samej nazwie jest kilka co nie wpływa na przejrzystość i może wprowadzać czytelnika w błąd. Pracę kończą „Wnioski” zawarte w 14 punktach. Na str. 5 (nienumerowanej) rozprawy Doktorant zamieścił okrojony wykaz symboli, oraz skrótów, natomiast na stronach od 160 do 171 wykaz Rysunków i Tabel.

Merytoryczna ocena pracy

Studium literaturowe, jakie mg inż. Artur Wojtyczka zaprezentował w rozdziale 2 rozprawy przedstawia charakterystykę procesu nawęglania, jego fizyczne i chemiczne podstawy, opis procesu niskociśnieniowego nawęglania próżniowego i obróbki cieplnej jaką wykonuje się po nawęglaniu dla elementów jakimi są koła zębate. Autor dość szczegółowo charakteryzuje ważniejsze podstawy fizykochemiczne procesu utwardzania powierzchniowego oraz dalszego hartowania, odpuszczania i obróbki podzerowej, analizując głównie fundamentalne aspekty wyżej wymienionych. Mimo, że studium literaturowe zostało przeprowadzone w sposób logiczny, a omówiona problematyka w części literaturowej koresponduje z tematem pracy oraz problematyką zaprezentowaną w części praktycznej, nie stanowi ono głębszej analizy i wieloaspektowości procesów technologicznych, pod kątem ich wpływu na grubość warstwy utwardzonej, jej morfologię, właściwości komponentu i inne aspekty, takie jak zmiany mikrostruktury, czy skład fazowy a także szczegóły morfologiczne składników mikrostruktury zarówno w materiale rodzimym jak i w warstwie nawęglanej decydujące o zespole właściwości kół zębatach. Niemniej jednak biorąc pod uwagę fakt, że praca jest ściśle technologiczna nie stanowi to wyraźnego wyznacznika obniżenia jej wartości.

¹ Artur Wojtyczka, Bartosz Iżowski, Microstructure and hardness of Pyrowear 53 steel after low-pressure vacuum carburizing at 921°C, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Research Article • DOI: 10.2478/amst-2019-0020 AMST • 44(4) • 2020 • 109–112.

W części eksperymentalnej pracy, na podstawie analizy przeglądu literatury Doktorant stawia tezę i cel rozprawy. Teza brzmi: **dobór parametrów procesu nawęglania próżniowego i wysokociśnieniowego hartowania gazowego pozwoli na „Opracowanie technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego satelitarnych kół zębatach przekładni lotniczej silnika FDGS, wykonanych ze stali Pyrowear53 i pracujących w warunkach długotrwałych i cyklicznie zmiennych obciążeń eksploatacyjnych”**.

Jako cel rozprawy Autor stawia opracowanie technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego wraz z jego certyfikacją w warunkach przemysłowych na kołach produkcyjnych planetarnych przekładni planetarnej FDGS wykonanych ze stali Pyrowear 53 (str.41).

W tym miejscu pozwolę sobie stwierdzić, że zarówno teza pracy jak i cel skupione są na opracowaniu technologii i są niemal identyczne, co utrudnia wskazanie, co tak naprawdę jest celem pracy i jak postawiona teza ma znaleźć potwierdzenie w zrealizowaniu celu. Autor spośród wielu wariantów jakie możliwe są do testowania w ramach doboru parametrów technologicznych postanowił dokonać ich analizy, wpływu na najważniejsze właściwości z punktu widzenia zastosowania i eksploatacji oraz dokonać ich weryfikacji a następnie poddać technologię certyfikacji. W tym miejscu zauważam, że w opinii recenzentki doprecyzowanie choć jednego z w.w parametrów wpłynęłoby na większą ścisłość tezy pracy z uwypukleniem najważniejszych parametrów, na które należy zwrócić uwagę w planowaniu procesu wytwarzania wyrobu końcowego.

W tym miejscu również muszę zauważyć, że wdrożeniowy charakter pracy, mnogość wariantów procesowych w obszarze wysokociśnieniowego hartowania gazowego, jakie Autor zdefiniował, zrealizował i wykonał zasługuje na podkreślenie. Doktorant przede wszystkim wykonał niezbędny i zawierający wielowariantowe podejście oraz alternatywność metod badawczych program badań doświadczalnych, który obejmował:

- 1) Badania stali Pyrowear w stanie po obróbce cieplnej zgodnie z normą AMS 6308.
- 2) Wykonanie procesu nawęglania próżniowego LPC w warunkach laboratoryjnych.
- 3) Przeprowadzenie obróbki cieplnej po procesie LPC.
- 4) Wykonanie badań strukturalnych, analiza mikrostruktury, przeprowadzenie badań twardości i badań wytrzymałości na rozciąganie zgodnie z normą PN-EN-ISO 6892.
- 5) Przeprowadzenie badań rozkładu naprężeń w warstwie wierzchniej.

Część doświadczalna i badawcza pracy ma dużą wartość użytkową choć w wielu obszarach prowadzonych badań i analiz można natknąć się na liczne błędy nomenklaturowe (np. badania twardości to nie badania wytrzymałościowe), nie dość dobrze opisane metody badań (opis badań wielkości ziarna str. 97) zbyt trywialne wnioski i mało wnikliwe analizy, co uznaję za uwagi krytyczne do pracy. W obszarze analizy mikrostruktury i mechanizmów towarzyszących procesowi nawęglania Autor prezentuje analizy, gdzie spotykamy stwierdzenia opierające się jedynie na obrazach mikrostruktury uzyskanych techniką mikroskopii świetlnej (str. 77 do 83, str. 90 do 96, analiza mikrostruktury i stwierdzenie braku wpływu parametrów obróbki cieplnej na mikrostrukturę podczas gdy ocenia się jedynie obrazy LM przy jednym powiększeniu, jak można się domyślić, gdyż na żadnym nie ma markera oznaczającego powiększenie obrazu z mikroskopu a mikrofotografie są zupełnie nieczytelne). Jak na rozprawę doktorską nawet o charakterze wdrożeniowym nie jest to podejście właściwe. Poszczególne rozdziały, choć można domyślić się ich struktury i wskazać na rzeczowy oraz praktyczny

charakter zawierają niejednokrotnie te same tytuły, co utrudnia czytanie i analizę. Rozdziały zawierają treści powtarzające się schematycznie niemal jak w raportach z prac badawczych. To zdaniem recenzentki można było dopracować i pomimo, iż rozprawa ma ściśle o charakter wdrożeniowy można było wydobyć z niej zarówno ten aspekt jak i aspekt naukowy przy, jak wcześniej wspomniałam, mnogości i wielowariantowości prowadzonych eksperymentów obróbki cieplno - chemicznej.

Oceniając tę część rozprawy stwierdzam, że jest ona poprowadzona logicznie, ale zawiera niedoskonałości i błędy metodyczne - interpretacyjne.

Konkludując, Doktorant zebrał ciekawy i praktyczny materiał z badań. Część eksperymentalna recenzowanej rozprawy została przygotowana na dostatecznym naukowym poziomie i na istotnym poziomie użytecznym. Doktorant mógł dołożyć starań aby zadbać o bardziej systematyczny, spójny i zgodny z dobrymi praktykami w pracach na poziomie rozpraw doktorskich poziom pisarski w zakresie nomenklatury, opisu metodyk badawczych, prezentowania i opisu wyników badań, tok realizacji pracy. Załączone rysunki, tabele oraz schematy choć są przejrzyste i uzupełniają tekst rozprawy często są zestawieniem wielu danych jakie prezentowane są w toku pomiarów a ich przydatność byłaby znacznie lepsza w rozprawie, gdyby zawierały mniejsze ilości danych ze wskazaniem na wstępne ich przeanalizowanie i zaprezentowanie w formie bardziej dostępnej czytelnikowi (np. tab. 37 ale i 23, 25, 29, 31, 32, 33, 35). Strona redaktorska powinna być bardziej dopracowana.

W tym miejscu wskazuję kilka kwestii dyskusyjnych, do których Pan mgr inż. Artur Wojtyczka będzie miał możliwość odnieść się podczas publicznej obrony:

1. W pracy prowadzono proces nawęglania w warunkach laboratoryjnych jak i przemysłowych. Proszę o wskazanie na jakiej podstawie dobrano parametry obróbki cieplno – chemicznej (recepty) w warunkach laboratoryjnych i czy stwierdzenie, że oba urządzenia spełniają wymagania normy lotniczej AMS 2750 ma udokumentowane podstawy.
2. W pracy analizowano zawartość austenitu szczątkowego w badanej stali metodą rentgenowskiej analizy fazowej - XRD, w celu zweryfikowania badań wizualnych. Proszę o uzupełnienie tej analizy o wskazanie, jakie wizualne badania zostały przeprowadzone i były punktem odniesienia w tym obszarze oraz jak wygląda opis metodyki badań zawartości austenitu szczątkowego wraz z podaniem przykładowych uzyskanych dyfraktogramów badanej stali. Mimo, że jak Doktorant konkluduje, zawartość austenitu szczątkowego spełnia wymagania norm odbiorczych, różnice w zawartości tego składnika struktury są duże dla poszczególnych zastosowanych parametrów obróbki, czym mogą skutkować znaczne różnice w zawartości austenitu szczątkowego w rdzeniu oraz w warstwie utwardzonej i jaki mogą mieć wpływ na właściwości wyrobu gotowego?
3. Autor analizuje w pracy w rozdziale 8.2.2. wielkość ziarna. Przedstawia mikrostrukturę rdzenia w zależności od zastosowanego schematu obróbki cieplnej a właściwie cieplno-chemicznej, po czym pisze o wielkości ziarna warstwy nawęglonej. Proszę o dokładne wyjaśnienie jaka to wielkość ziarna była analizowana, gdyż według recenzentki jest to analiza tzw. PAGS czyli byłego ziarna austenitu, jakimi technikami została ujawniona wielkość ziarna byłego austenitu, w jakim celu jest ona w pracy poddawana pod uwagę i wg jakiej metody została oceniona owa wielkość ziarna.

4. We wniosku 6 Autor pisze o występowaniu w warstwie nawęglonej węglików o dużych rozmiarach i kształcie. Nie doszukałam się w pracy ani analizy jakościowej, ani tym bardziej ilościowej związanej z występującymi w warstwie utwardzonej węglnikami, ani oceny wpływu parametrów procesu technologicznego na występowanie, wielkość i morfologię tej fazy, co we wniosku 6 Autor wyraźnie wskazuje. Proszę o odniesienie się do tego zagadnienia.

Powyższe pytania oraz uwagi, w tym dyskusyjne, będą poruszone na publicznej obronie rozprawy i nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o recenzowanej pracy doktorskiej Pana mgr inż. Artura Wojtyczki.

Stwierdzam, iż przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi bazę danych, informacji i po części wiedzy, jakie wykorzystał Autor do prac nad opracowaniem technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego w warunkach laboratoryjnych oraz jej testowaniem w warunkach przemysłowych, co stanowi niewątpliwie cenne osiągnięcie.

Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Doktorant rozwiązał problemy o ważnym znaczeniu poznawczym i technologicznym z zakresu technologii procesu niskociśnieniowego nawęglania próżniowego LPC połączonego z wysokociśnieniowym hartowaniem gazowym HPGQ. Wykazał się wiedzą z zakresu przedmiotu pracy, stosowanych technik i metod badawczych oraz przede wszystkim umiejętnościami połączenia wielu wyników badań i logicznego wnioskowania. W obszarze prac wdrożeniowych można podkreślić fakt praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań ale jednocześnie niedosytu naukowego aspektu rozprawy doktorskiej jako potwierdzenia niezbędnej dla rozpraw doktorskich wnikliwości Autora, w obszarze dostępnych prac o charakterze scjencystycznym. Niemniej jednak na podkreślenie zasługuje doświadczenie i wiedza Autora z zakresu tematyki objętej pracą. Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska

Pana mgr inż. Artura Wojtyczki pt.:

„Opracowanie technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego satelitarnych kół zębatych przekładni lotniczej silnika FDGS, wykonanych ze stali Pyrowear53 i pracujących w warunkach długotrwałych i cyklicznie zmiennych obciążeń eksploatacyjnych”

jest dziełem dysertabilnym i spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 85, z późn. zm.).

W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy mgr inż. Artura Wojtyczki i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Magdalena Jabłońska